



## 저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

거리 센서 모듈용  
Electro Thermal Two Phase  
Aperture

Electro Thermal Two Phase Aperture for  
Distance Sensor Module

2017 년 8 월

서울대학교 대학원

전기정보공학부

양우진

거리 센서 모듈용  
Electro Thermal Two Phase  
Aperture

지도 교수 전 국 진

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함

2017 년 8 월

서울대학교 대학원

전기정보공학부

양 우 진

양우진의 공학석사 학위논문을 인준함

2017 년 8 월

위 원 장 \_\_\_\_\_ 권 성 훈 (인)

부위원장 \_\_\_\_\_ 전 국 진 (인)

위 원 \_\_\_\_\_ 이 정 훈 (인)

# 초 록

## 거리 센서 모듈용

# Electro Thermal Two Phase Aperture

서울대학교 대학원

전기정보공학부

양우진

최근 인공지능 및 IoT의 발달에 따라 어플리케이션용 거리 센서 모듈에 대한 필요성이 증가되고 있다. 많은 어플리케이션 중 드론과 자율 주행 자동차가 대표적인 사례라고 할 수 있을 것이다. 드론과 자율 주행 자동차는 비행 또는 주행 중 발생할 수 있는 충돌이나 주위 환경을 감지하기 위해서 거리 센서가 필수적이다. 주위 3D 이미지 정보를 통해 거리뿐만 아니라 물체 인식, 동작 인식에 대한 기능도 요구되고 있다. 더불어 이러한 어플리케이션으로서 거리센서가 사용되려면 외부에서 동력원을 별도로 연결해 사용하는 데에 어려움이 있어 낮은 전압에서 동작할 수 있는 것도 하나의 요구사항이 되어가고 있다.

하지만 현재까지의 aperture에 대한 연구는 100V 내외의 큰 전압을 사용하거나 큰 변위를 생성하지 못하는 등의 어려움이 있다. 본 논문에서는 기존의 chevron beam 구조를 사용해 변위를 생성하는 것뿐만 아니라 chevron output beam이 서로 misalign된 구조를 통해 낮은 전압에서 보다 큰 변위를 생성하는 방식을 제안하였다.

Main beam 양 끝에 셔터, 더미 역할을 하기 위한 원판 형태의 구조물이 연결되어 있으며 main beam을 움직이기 위한 chevron output

beam이 main beam에 수직하게 연결되어 있다. Actuator로부터 힘이 전달되는 misalign된 구조가 chevron beam의 linear한 운동이 셔터가 각도를 가지고 시계방향으로 운동하도록 만들어준다. 전압이 가해지지 않은 상태에서는 한 개의 구멍이 열려 있고 한 개의 구멍은 셔터가 가리고 있는 상태이고, 전압이 가해지게 되면 셔터가 움직여 두 개의 구멍이 모두 열리게 된다.

이러한 소자의 설계를 위하여 시뮬레이션으로 구조물의 각 수치에 따른 변위 변화를 확인하였으며 최대의 변위를 얻기 위한 수치를 설정하였다. 이를 통해 chevron beam의 pre-bent angle과 chevron output beam misalignment는 최대의 변위를 갖는 최적의 조건을 구할 수 있었다. 설정된 수치는 pre-bent angle  $2^{\circ}$ , chevron beam width  $10\mu\text{m}$ , chevron output beam width  $3.2\mu\text{m}$ , misalignment  $30\mu\text{m}$ 이었다.

소자는 서울대학교 반도체공동연구소에서 실리콘 기판과 유리 기판 위에 각각 반도체 공정으로 패턴을 형성한 뒤 실리콘 기판과 유리 기판을 anodic bonding하였으며 beam과 셔터의 두께가  $30\mu\text{m}$ 가 되도록 CMP(Chemical Mechanical Polishing)공정을 진행하였다. 그리고 CMP 공정이 진행된 실리콘 면에 chromium layer를 증착한 후, 전극 패드로 사용될 패턴을 형성하기 위해 RIE etcher를 이용하여 식각하였다. 마지막으로 동작할 구조물을 형성하기 위해 DRIE 장비에서 식각 공정을 통한 구조물의 release가 진행됨으로 소자가 제작되었다.

소자의 DC 동작 특성 및 hysteresis를 probe station으로 측정하였다. DC 동작 특성은 9V에서  $793.32\mu\text{m}$ 의 변위를 보였으며, hysteresis는 평균  $21.11\mu\text{m}$ 의 크기를 보였다.

**주요어:** Chevron thermal actuator, Misaligned beams, thermal aperture, hysteresis

**학 번:** 2014-22566

# 목 차

제 1 장 서론 .....	1
1.1 연구의 배경 .....	1
1.2 Aperture 연구 동향.....	4
1.3 논문의 구성 .....	13
제 2 장 설계 .....	14
2.1 Electro thermal two phase aperture 설계 .....	14
2.2 시뮬레이션.....	20
제 3 장 제작 .....	26
3.1 제작 순서 .....	26
3.2 제작 결과 .....	29
제 4 장 측정 .....	39
4.1 측정 set up .....	39
4.2 DC 동작 특성 측정 .....	41
4.3 Hysteresis 측정 .....	43
제 5 장 결론 .....	47
참고 문헌 .....	48
Abstract .....	51

## 표 목차

표 1.1 개발된 aperture의 성능 비교표.....	12
표 2.1 시뮬레이션에 사용한 Silicon 특성 .....	20
표 2.2 시뮬레이션을 통해 결정된 구조물의 dimension .....	24
표 3.1 제작에 사용된 장비 .....	26
표 3.2 Rinse Dry 공정 .....	29
표 3.3 AZ4620을 이용한 양각 사진 공정 조건 .....	30
표 3.4 Depth measurement 장비로 측정한 웨이퍼별 9 포인트 단차(W: 넓은 패턴, N: 좁은 패턴) .....	31
표 3.5 웨이퍼 별 식각 깊이와 식각률 .....	32
표 3.6 웨이퍼 별 패턴 사이즈에 따른 단차 차이 .....	33
표 3.7 AZ5214를 이용한 양각 사진 공정 조건 .....	33
표 3.8 RIE 장비의 Cr 식각 공정 조건 .....	33
표 3.9 테스트 웨이퍼의 식각 깊이 및 식각률 .....	36
표 3.10 웨이퍼별 구조물 두께 및 1차 DRIE 공정 횟수 .....	36
표 4.1 실제 측정한 수치와 그에 따른 재 시뮬레이션 결과 .....	43
표 4.2 전압 상승, 하강시 변위와 각 전압별 변위 차이 .....	45

## 그림 목차

그림 1.1 구글의 무인 자동차 Google Car(위), Apple의 무인자동차 iMove(아래) .....	2
그림 1.2 Electro thermal 구동 방식의 sliding blades를 사용한 MEMS iris.....	4
그림 1.3 Electro thermal 구동 방식의 liquid-crystal elastomer aperture .....	5
그림 1.4 Electrostatic 구동 방식의 rotary actuator를 이용한 MEMS iris의 (a)전체 동작 모식도 (b) single blade 구성 모식도.....	6
그림 1.5 Piezoelectric 구동 방식의 liquid aperture 단면도.....	7
그림 1.6 Dielectric force를 사용한 liquid iris의 (a) 전압을 인가하기 전 (b)AC 전압 인가 후 모습.....	8
그림 1.7 Electrofluidic 구동 방식의 MEMS liquid aperture.....	9
그림 1.8 Electrofluidic 구동 방식의 liquid iris 전압 인가 (a)전, (b)후10	
그림 1.9 Electrofluidic 구동 방식의 optical switch/aperture의 단면도 전압 인가 (a)전, (b)후 .....	11
그림 2.1 Chevron beam 모식도.....	15
그림 2.2 Misaligned 구조를 가지는 electro thermal two phase aperture .....	16
그림 2.3 조리개 동작 모식도, 전압 인가 (a)전 (b)후 .....	18
그림 2.4 Dual aperture사의 multi-aperture를 이용한 이미지 처리 ...	19
그림 2.5 Chevron beam의 pre-bent angle과 displacement의 시뮬레이션.....	21
그림 2.6 Chevron beam과 chevron output beam의 width와 displacement의 시뮬레이션 .....	22
그림 2.7 Chevron output beam간의 misalignment와 displacement의 시뮬레이션.....	23



그림 2.8 설정 된 dimension의 전압과 변위에 대한 시뮬레이션 .....	25
그림 3.1 단면도와 입체 그림을 이용해 나타낸 공정 흐름도 .....	28
그림 3.2 패터닝이 완료된 실리콘 웨이퍼 .....	29
그림 3.3 측정한 넓은 패턴과 좁은 패턴의 위치 .....	32
그림 3.4 패터닝이 완료된 글래스 웨이퍼 .....	34
그림 3.5 실리콘 웨이퍼와 글래스 웨이퍼의 양극 접합 (a)전 (b)후 ....	34
그림 3.6 접합된 웨이퍼의 CMP 공정 완료 후 실리콘 면 .....	35
그림 3.7 Release 공정 후 형성된 실리콘 구조물과 모식도 .....	38
그림 4.1 측정 셋업 모식도 .....	40
그림 4.2 전압이 인가되기 (a)전, (b)후 실리콘 구조물의 모습 .....	41
그림 4.3 Chevron beam과 그 등가저항 .....	42
그림 4.4 5개 소자의 전압 상승 구간 전압-변위 그래프 .....	42
그림 4.5 전압 (a)상승 (b)하강 구간에서 1개 소자의 전압-변위 5회 측 정 결과 .....	44
그림 4.6 전압 상승 및 하강시 평균 변위 그래프 .....	45
그림 4.7 측정 결과와 실제 측정 결과에 따른 재 시뮬레이션 결과 .....	46
그림 4.8 측정 결과와 최근 연구 결과의 비교 그래프 .....	46

# 제 1 장 서 론

## 1.1 연구의 배경

최근 인공지능 및 IoT의 발달로 인해 어플리케이션용 거리 센서 모듈의 필요성이 증가하고 있다. 현재 가장 크게 관심을 끌고 있는 것으로는 자율 주행 자동차와 드론을 꼽을 수 있다.

먼저 자율주행 자동차의 경우, 국내외와 자동차업계 비자동차업계를 막론하고 자율 주행 및 운전자 보조 시스템(Advanced Driver Assistance systems, ADAS)에 대한 연구가 활발해지고 있다. 미국 도로교통안전국(National Highway Traffic Safety Administration, NHTSA)에서 발표한 자료의 정의에 따르면 사람이 완전히 배제되어 주행에 아무런 개입도 필요하지 않은 Level 4를 완전한 자율 주행이라 정의한다[1]. 자율 자동차 시장에서는 현재 기술은 Level 1~2정도 수준으로 평가하고 있으며 완전한 자율 주행 Level 4 수준의 기술을 확보하기 위해 전세계적으로 산업계와 학계 모두 큰 관심을 기울이고 있다.

국내의 경우 현대·기아차에서는 2010년 첫 자율주행차로 ‘투싼ix 자율주행차’를 데모카 형식으로 선보였다. 2015년 11월에는 미국 네바다 주에서 고속도로 자율주행 면허를 획득해 자율주행을 테스트 중에 있으며 2030년 완전 자율주행 상용화를 목표로 2018년까지 2조원을 투자할 계획이다.

해외의 경우 벤츠는 2016년 ‘Future Bus’로 네덜란드 암스테르담에서 20km 길이 11개 정류장의 버스 노선을 버스 운전사가 동승한 상태에서 시험 운행을 성공했다. 폭스바겐은 2017년 ‘2017 북미 국제 모터쇼(NAIAS)’에서 자율주행 전기차 ‘I.D.’를 공개하였으며 2021년 판매를 목표로 연구가 진행 중이다. 도요타의 경우 현재

‘하이웨이 팀메이트’(Highway Teammate)로 명명된 시제품처럼 2020년경 출시를 목표로 고속도로에서 달릴 수 있는 자율주행 자동차를 개발 중이다.

그 외에도 닛산, 혼다, 테슬라 등 9개 업체가 캘리포니아 주에서 면허를 획득해 자율주행 시험을 하고 있으며 네바다 주에서 아우디, 다임러트럭, 구글, 현대·기아차가 자율주행 테스트를 진행 중에 있다.

자동차 업계뿐만 아니라 비자동차 업계에서도 자율주행차, 무인자동차에 대한 연구를 진행하고 있다. 그림 1.1은 구글과 애플의 무인자동차인 Google Car와 iMove이다. 구글은 2009년부터 미국내 실제 도로에서 시험운행을 시작하였으며, 애플은 2019년을 출시를 목표로 iCar를 개발 중이다.



그림 1.1 구글의 무인 자동차 Google Car(위), Apple의 무인자동차 iMove(아래)

자율주행 자동차가 자동차 시장에서의 영역을 점차 넓혀갈 것으로 예상되는 가운데 이러한 자율주행 자동차에 대한 연구가 진행되면서 인공지능이 도로 주행 중에 마주하는 다른 차량과의 거리를 측정하거나 갑작스런 상황 변화로 인한 충돌을 방지하기 위해 거리센서의 필요성이 크게 증가하고 있다.

드론 역시 전세계적으로 큰 관심을 끌고 있다. 국내의 경우 국토교통부에서 2020년까지 무인 드론 배송을 상용화할 계획을 밝혔다. 2017년까지 한 지점에서 다른 지점으로 물품을 옮길 수 있는 ‘포인트 투 포인트’를 시험하고, 2018년부터는 배송지부터 집 문 앞까지 물품을 전달할 수 있는 ‘도어 투 도어’ 단계를 시험할 예정이다.

해외의 경우 아마존에서는 주문 후 30분 내에 물품을 받아 볼 수 있는 ‘프라임 에어’ 서비스를 일부 선보였다. 아마존에서 사용하는 ‘프라임 에어’용 드론은 16km이상 비행이 가능하고 운반 가능한 무게는 최대 2.26kg 정도이다. 그 외에도 구글의 지주사인 알파벳에서는 ‘윙 프로젝트’라는 이름으로 드론을 개발 중이다.

드론 개발 과정에서도 주위 3D 이미지로부터 주변 환경에 대한 정보를 파악하고 거리를 측정하는 기술의 개발 역시 활발히 진행되고 있으며, 이에 거리 센서 모듈의 중요성 또한 높아지고 있다.

따라서 자율 주행 자동차 및 드론과 같은 어플리케이션에 이용될 수 있는 거리 센서에 대한 선행 기술을 확보 및 선점하는 것이 중요하다. 그 중에서도 aperture를 사용한 거리 센서 모듈의 경우, 차량용뿐만 아니라 일상 생활 및 공공장소에서 거리 측정 및 감지 용도, 3D 이미지 영상 내 거리 정보 추출 등에 응용 가능해 그 활용도가 높다 할 수 있다.

Aperture를 이용한 거리 센서의 경우, 이와 같이 상용화 되기 위해서 만족해야 할 여러 주요 특성들이 있다. 그 특성들로는 aperture가 완전히 열릴 때의 동작 전압 및 전력, aperture가 가질 수 있는 최대 동작 변위, 실시간으로 정보를 파악하기 위한 동작속도, 신뢰성 등이 있다.

## 1.2 Aperture 연구 동향

1.1절에서는 자동차 시장에서 떠오르고 있는 자율주행 자동차의 현재 시장 상황과 자율주행 연구의 하드웨어적인 측면에서 aperture를 사용한 거리 센서 모듈의 중요성, 응용방안, aperture의 성능을 결정짓는 주요 특성 등에 대하여 서술하였다.

실제로 다양한 종류의 tunable aperture에 대한 연구가 진행되고 있으며 본 절에서는 aperture의 연구 동향에 대하여 서술하고자 한다.

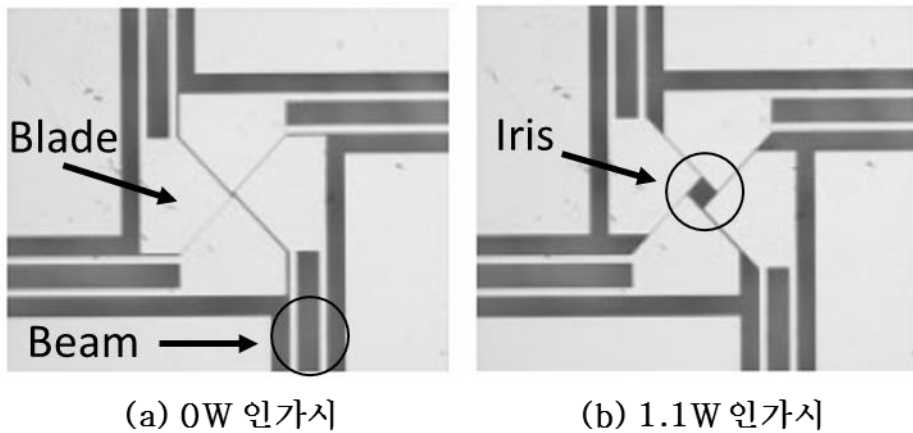


그림 1.2 Electro thermal 구동 방식의 sliding blades를 사용한 MEMS iris [2]

그림 1.2는 4개의 sliding blade를 사용한 MEMS iris이다. Electro thermal 방식으로 구동하며 blade의 한 쪽끼리 서로 전기적으로 연결되어 있어 전압을 가해주면 동시에 전류가 흐르며 줄열에 의해 beam이 가열되기 시작한다. 가열된 2개의 beam은 팽창하며 변위를 생성하게 되고 blade당 2개씩 연결된 beam이 blade를 밀어주어 총 네 개의 blade가 반 시계방향으로 회전하며 iris의 크기가 늘어나는 방식이다.

Blade에 연결된 두 개의 beam에 각각 8V의 전압을 연결하고 접지를 시켜주어 1.1W의 전력을 인가하였을 때, 약  $40\mu\text{m}$ 의 변위를

생성하였다. 그림은 beam에 각각 전압을 인가하지 않았을 때와 1.1W의 전력을 인가했을 때와 인가하지 않았을 때의 모습이다[2].

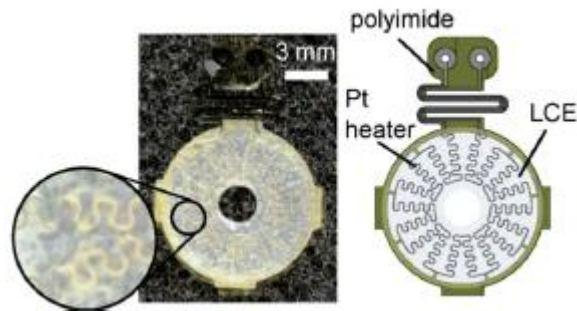
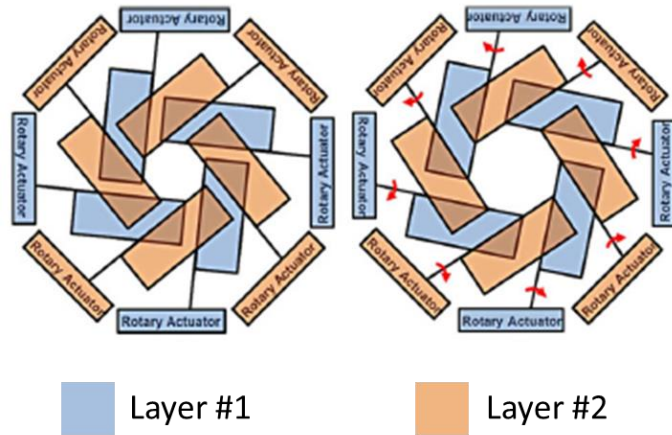


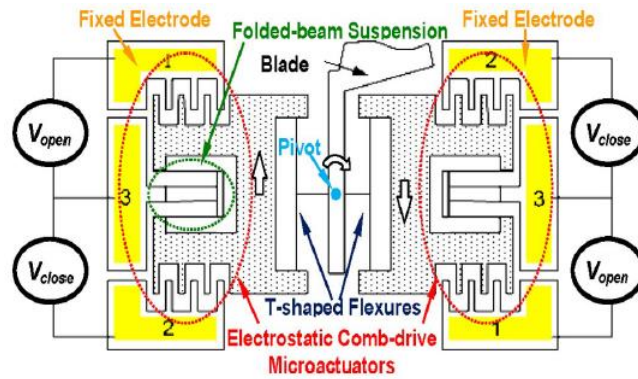
그림 1.3 Electro thermal 구동 방식의 liquid-crystal elastomer aperture[3]

그림 1.3은 Pt heater를 통해 지름을 조절하는 aperture의 단면도이다. Liquid crystal elastomer(LCE) 내부에 Pt heater가 직접 접촉하고 있어 Pt heater에 전압이 가해지면 열로 인해 Pt heater가 수축하며 aperture의 중심으로부터 멀어지는 방향으로 LCE를 끌어당기게 된다. 이 LCE가 Pt heater에 의해 당겨져 중심으로부터 멀어지게 되면 aperture의 크기가 커지게 되는 원리이다.

Pt heater 양 끝에 있는 패드에 전압을 0V에서 시작해서 50V까지 서서히 올려주면 2.7mm였던 지름은 3.8mm로 늘어나게 된다[3].



(a)



(b)

그림 1.4 Electrostatic 구동 방식의 rotary actuator를 이용한 MEMS iris의 (a)전체 동작 모식도 (b) single blade 구성 모식도 [4]

그림 1.4(a)의 경우 electrostatic 방식의 rotary actuator를 이용하여 MEMS iris의 모식도이다. 모식도에서 하늘색으로 표시된 layer #1과 주황색으로 표시된 layer #2가 서로 접촉되지 않은 상태로 위치한다. 각 layer당 4개씩 8방향으로 배치된 T 형태의 blade가 90도의 각도로 배치가 되었으며, layer간에는 45도의 각도로 align되어 배치되어있다. 그림 1.4(b)와 같이 전압 인가 패드는 blade 기준 좌우 두 곳에 배치되어 있으며 3번 패드를 접지시키고 1번 패드에 전압을 인가하면 시계방향, 2번 패드에 전압을 인가하면 반 시계 방향으로

comb-drive의 동작에 따라 blade가 회전하게 된다. 1번 패드에 전압이 인가되어 시계방향으로 blade가 회전하게 되면 8개의 blade가 겹쳐 형성된 중앙의 iris가 커지게 된다. 반 시계 방향으로 blade가 회전할 경우 iris는 작아지게 된다.

이 방식은 1번 패드에 100V의 전압을 가해주었을 때, 10도의 각도까지 회전가능하고 1.03mm의 직경이 1.56mm로 증가하였다. 반대로 2번 패드에 전압시계 반대 방향으로 회전하는 경우 11도의 각도까지 회전하였으며 1.03mm의 직경이 0.45mm로 줄어들었다[4].

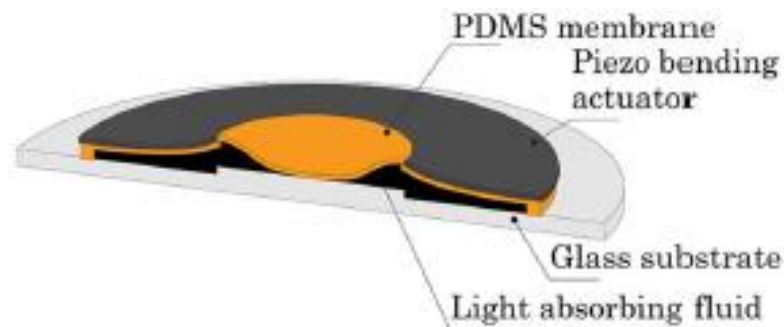


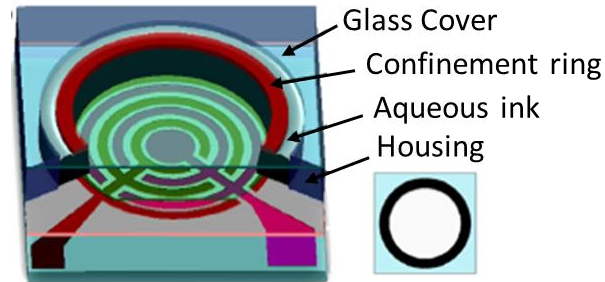
그림 1.5 Piezoelectric 구동 방식의 liquid aperture 단면도 [5]

그림 1.5는 piezoelectric 방식의 liquid aperture의 단면도이다. PDMS membrane과 글래스 웨이퍼 사이에 light absorbing fluid가 채워져 있고 PDMS membrane 위로는 actuator로 사용되는 piezo foil을 접합시킨 구조이다. Piezo bending actuator에 전압이 가해지지 않은 상태에서는 PDMS membrane이 평평하게 유지되어 membrane 하단으로 light absorbing fluid가 채워져 빛이 통과하지 못한다. 반대로 piezo bending actuator에 전압이 가해졌을 때는 actuator가 위쪽으로 휘게 되어 PDMS membrane 하단 공간의 압력이 낮아지게 되고 PDMS membrane이 글래스 기판 쪽으로 끌어당겨지게 된다. 결과적으로 membrane 아래에 있던 light absorbing fluid가 빠져나가면서 빛을 투과하게 되어 조리개가 커지는 방식이다.

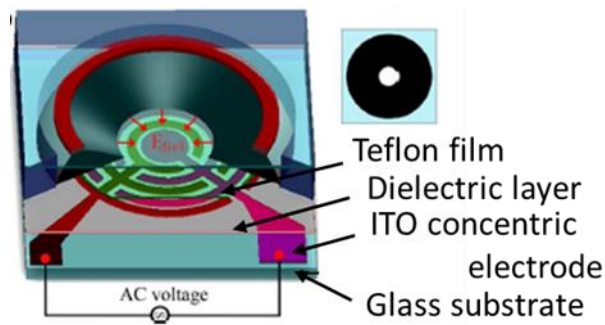
Piezo bending actuator에 80V의 전압을 인가하면 0mm였던



직경이 4.55mm로 커지는 aperture를 제작하였다. 그리고 light absorbing fluid로 인해 상대적 투과율의 경우 최대 6%정도 감소하였다[5].



(a)



(b)

그림 1.6 Dielectric force를 사용한 liquid iris의 (a) 전압을 인가하기 전 (b)AC 전압 인가 후 모습 [6]

그림 1.6(a)의 aperture는 네 개의 파트로 구성되어 있는데 혼합되지 않는 투명한 액체와 불투명한 잉크와 ITO 전극 기판, 글래스 커버, 그리고 PMMA housing으로 구성되어 있는 dielectric liquid iris의 구조를 나타내고 있다. 동작 방식은 glass cover 아래에 dielectric liquid가 ring 형태로 채워져 있는 상태에서 하단의 dielectric layer에 AC 전압이 가해지면서 dielectric liquid-liquid 사이 표면에 인가된 극성 전하와 전기장 사이의 상호작용으로 인해 발생한 dielectric force로 인해 dielectric liquid가 중앙을 향해 끌려오면서 빛을 차단해 조리개의 크기가 줄어드는 형태이다.

이 구조는 160V의 AC를 구조물 하단의 ITO concentric electrode에 가했을 때, 4.0mm의 직경이 1.6mm로 감소하였다. 가해지는 전압에 따라 이차함수 형태로 조리개의 직경은 감소하며 전 범위의 파장에 걸쳐 85%의 투과율을 보였다. 최대 소비 전력은 5.7mW이다[6].

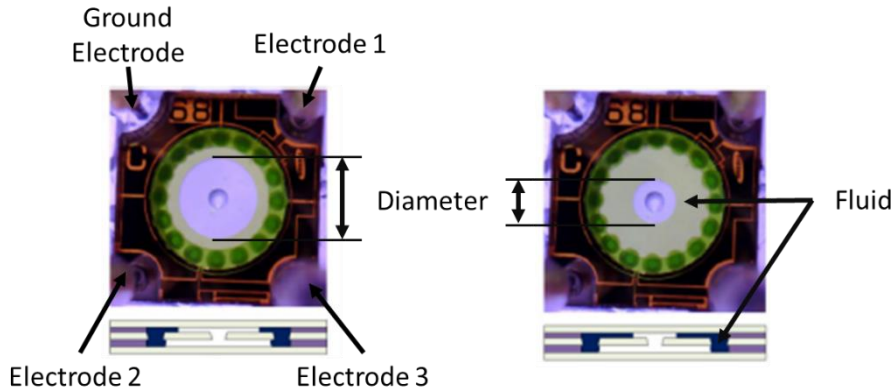


그림 1.7 Electrofluidic 구동 방식의 MEMS liquid aperture[7]

그림 1.7은 electro-wetting 방식을 사용한 liquid MEMS iris에 대한 구조를 설명한 것이다. 2개의 channel을 평행한 3개의 글래스 기판 사이에 배치하여 전극에 전압이 가해지면 fluid가 글래스 면과 형성하는 접촉 각도가 줄어들게 되고, fluid가 차지하는 면적이 늘어나 iris의 크기가 줄어들게 된다. 전체 소자의 크기는 9mm x 9mm x 2mm이고 글래스 기판은 모두 500  $\mu$ m이며 main channel과 sub-channel을 형성하게 만드는 spacer의 경우 각각 125  $\mu$ m, 325  $\mu$ m 두께를 가진다. 전극의 경우 소자의 네 귀퉁이에 위치하는데 투명하고 동심원을 가지도록 하기 위해 ITO(Indium, Tin Oxide)를 이용하여 패터닝하였다.

이 iris는 좌측 상단의 전극을 접지시키고 나머지 세 전극에 100V의 전압을 가했을 때 4.2mm이었던 직경이 0.85mm까지 감소하였다. 그리고 이 소자가 닫힌 후 다시 열리기까지 걸리는 최소 시간은 42ms이며, 이 최소 시간을 가질 때의 전압은 90V이다.

Aperture의 동작 속도는 80mm/sec이다[7].

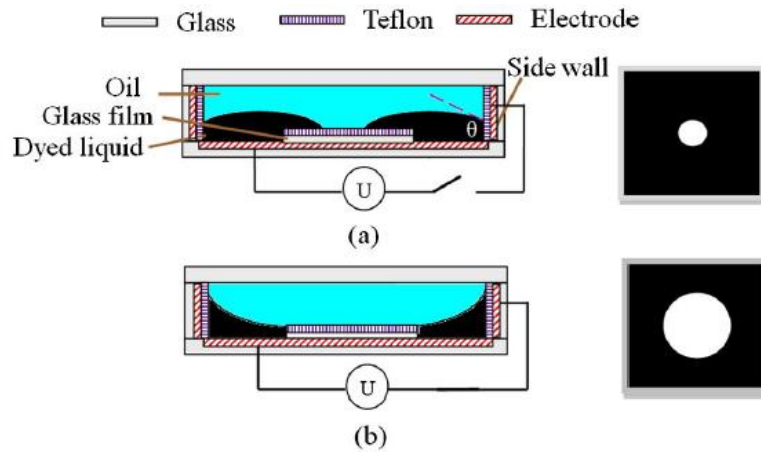


그림 1.8 Electrofluidic 구동 방식의 liquid iris 전압 인가  
(a) 전, (b) 후 [8]

그림 1.8의 경우도 electro wetting 방식을 사용한 liquid iris의 단면도이다. 두 개의 글래스 기판 사이에 공간이 형성되어 있으며 ITO electrode, 테플론 층 순서로 측벽과 아래 기판의 표면을 덮고 있다. 아래 쪽 기판 표면은 테플론 층이 중앙 부분만을 덮도록 코팅되어 있다. 두 글래스 기판 사이 공간에는 불투명한 액체 층과 기름 층이 섞이지 않은 상태로 존재하는데, ITO electrode에 전압을 가해주게 되면 초기에 링 형태로 위치하던 불투명한 액체 층이 전극 층을 따라 원형으로 퍼져나가게 된다. 그 결과 중앙 부를 덮고 있던 불투명한 액체의 면적이 감소하면서 iris는 커지게 된다.

0V에서 2.3 mm의 지름을 가지고 있는 이 iris는 ITO electrode에 전압을 서서히 올려주면 36V까지는 지름의 변화가 없다가 36V 이후로 지름이 증가하기 시작해 전압을 65V까지 올려주면, 지름이 6.1mm로 늘어나게 된다[8].

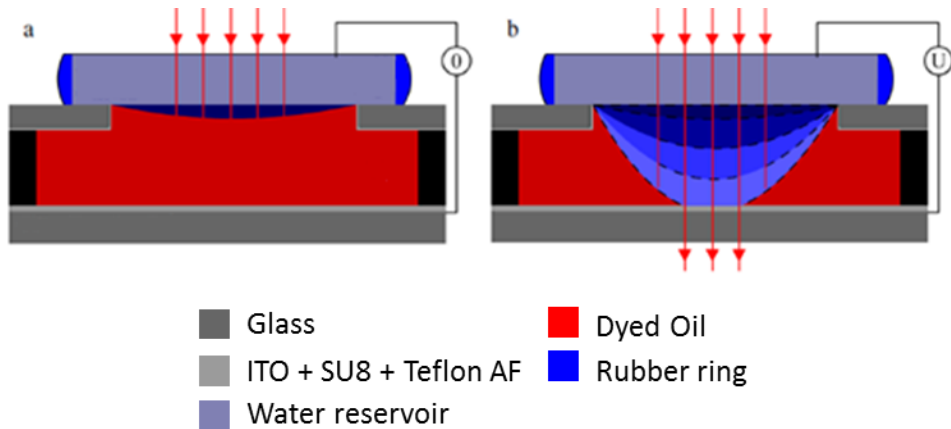


그림 1.9 Electrofluidic 구동 방식의 optical switch/aperture의 단면도 전압 인가 (a)전, (b)후[9]

그림 1.9은 electro wetting을 이용한 optical switch와 aperture가 결합되어 있는 구조물의 단면도이다. 두 글래스 기판 사이에 불투명한 기름 층이 존재하며, 기름 층과 접하는 두 글래스 면은 모두 ITO, SU-8, Teflon AF 순으로 코팅이 되어 있다. 위 쪽에 위치한 글래스 기판 상단에는 물 층이 존재하는데 전압이 물 층과 ITO 층에 인가되면 기름 층에 전기장이 생성되게 된다. 전기장으로 인한 전기적 스트레스가 물과 기름 층 사이의 곡면이 아래 쪽으로 휘게 만든다. 점점 전압을 증가시면 곡면이 하단의 기판과 만나게 되고 글래스 기판의 중앙 부는 불투명한 기름 층 없이 빛을 투과시키게 된다.

물 층과 ITO electrode에 전압을 42V 인가하여 1.2mm 직경의 aperture를 완전히 생성한 후, 전압을 낮추어 aperture의 크기를 줄여나가면 20V에서 0.2mm의 직경을 형성하게 된다[9].

이 여덟 가지의 서로 다른 방식에 대한 동작 방식과 성능을 정리하면 표 1.1과 같다.

Aperture 연구 동향				
발표 기관	Imperial College	University of Freiburg	University of Singapore	University of Freiburg
구동 방식	Electro-thermal	Electro-thermal	Electro-static	Piezo-electric
동작 전압	8V	50V	100V	80V
변위, 변화 직경	40 $\mu$ m	2.7mm $\rightarrow$ 3.8mm	1.03mm $\rightarrow$ 0.45mm	0mm $\rightarrow$ 4.55mm
변위/전압	5.0 $\mu$ m/V	22 $\mu$ m/V	5.8 $\mu$ m/V	56.9 $\mu$ m/V
발표 기관	Tsing Hua University	SAIT	Sichuan University	University of Twente
구동 방식	Dielectric liquid	Electro-fluidic	Electro-fluidic	Electro-fluidic
동작 전압	160V	90V	65V	42V
변위, 변화 직경	4.0mm $\rightarrow$ 1.6mm	4.2mm $\rightarrow$ 0.85mm	2.3mm $\rightarrow$ 6.1mm	1.2mm $\rightarrow$ 0.2mm
변위/전압	15 $\mu$ m/V	37.2 $\mu$ m/V	5.8 $\mu$ m/V	23.8 $\mu$ m/V

표 1.1 개발된 aperture의 성능 비교표

표 1.1과 같이 여러 방식의 aperture 및 iris의 경우 큰 변위를 생성하지 못하거나 인가해주어야 하는 전압이 100V 내외로 높다. 따라서 본 논문에서는 낮은 전압으로 상대적으로 큰 변위를 생성할 수 있는 거리 센서용 electro thermal 방식의 two phase aperture를 제안하고자 한다.

### 1.3      논문 의 구성

본 논문은 다음과 같이 구성되었다. 2장의 1절에서는 본 연구를 통해 차량용 거리센서 모듈에 사용될 수 있는 chevron beam을 사용한 thermal actuator을 설계하였다. 2장의 2절에서는 ANSYS 16을 이용하여 설계한 구조물의 여러 변수 pre-bent angle, beam의 두께, misalignment 에 대한 생성 변위의 시뮬레이션을 진행하여 각 변수들이 변위에 미치는 경향성을 파악하였다. 이 시뮬레이션 결과를 통해 제작하고자 하는 electro thermal two phase aperture의 주 목표 값에 도달하기 위한 수치를 설정하였다.

3장의 1절에서는 설계한 구조물을 형성하기 위한 공정 흐름도와 함께 간략한 공정 순서에 대하여 서술하였다. 3장 2절에서는 공정 단계별로 자세한 공정방법과 각 단계의 조건에 대해 서술하였고 매 공정단계를 마친 뒤의 결과에 대해 정리하고 실제 제작에 사용한 물질, 장비, 공정 결과에 대해 나타내었다.

4장에서는 서술한 공정 방법으로 제작된 소자에 대해 측정을 진행하였다. 4장 1절에서는 측정을 위한 set up에 대해 모식도와 함께 측정 방법에 대하여 서술하였고, 4장 2절에서는 앞 절에서 서술한 방식의 set up과 측정 방법으로 소자의 DC 특성에 대한 거리 측정에 대해 정리하고 결과를 분석하였다. 4장 3절에서는 소자의 잔류 열에 의한 hysteresis에 대해 같은 방식으로 측정 및 분석하였다.

5장은 결론으로 thermal 방식으로 동작하는 misaligned beam 구조에 대해 설계, 제작, 측정 및 분석 결과를 요약하였다.

## 제 2 장 설 계

본 장에서는 거리 센서에 쓰일 수 있는 electro thermal two phase aperture의 설계에 대해 다루었다. 거리 센서의 주 용도 중 하나인 차량용 거리 센서로의 설계를 감안하였을 때, 일반적인 자동차 배터리의 출력 전압 15V 내외의 전압을 사용할 수 있어야 하므로 15V이하의 상대적으로 낮은 전압에서 조리개를 완전히 구동할 수 있는 충분한 변위를 생성할 수 있도록 aperture를 설계하였다.

이러한 조건을 만족시키기 위하여 구동부는 double chevron beam을 사용하여 전류에 의해 발생하는 Joule 열이 chevron beam을 팽창시키고 이를 통해 변위를 전달 받은 chevron output beam이 misalignment를 통해 최종적인 생성 변위를 충분히 확보할 수 있도록 설계하였다.

2장 1절에서는 설계하고자 하는 electro thermal two phase aperture의 가장 기본적인 구조인 chevron beam의 동작 원리와 이론에 대해 간략히 설명 및 정리하고 chevron beam 사용한 electro thermal two phase aperture 구조물에 대하여 서술하였으며 구조물의 크기를 설정하는데 있어 필요한 design consideration에 대하여 서술하였다.

2장 2절에서는 보다 구체적인 수치를 확정하기 위하여 진행된 ANSYS 16 시뮬레이션과 각 시뮬레이션에 대한 결과를 정리하였다. 최종적으로는 제작하고자 하는 구조물의 수치를 결정하였다.

### 2.1 Electro thermal two phase aperture 설계

차량용 모듈의 경우 자동차 배터리 이외의 동력원으로부터 전력을 공급받기가 쉽지 않고, 추가적인 동력원을 차량용 모듈과 함께 배치하는

것은 점점 고집적화 되고 복잡해지는 차량 부품 및 회로에 전기적 이슈를 야기할 수 있기 때문에 자동차 배터리로 공급 가능한 전력, 전압 수준의 모듈을 설계하는 것이 중요하다.

따라서 차량용 거리센서에 들어갈 조리개를 만들기 위해서는 10V 내외의 전압을 이용해 큰 변위를 생성해낼 수 있는 조리개를 설계해야 한다. 이러한 조리개를 설계하기 위해 chevron beam과 misaligned chevron output beam을 이용하고자 한다.

Chevron beam은 그림 2.1과 같은 구조에서 전압을 가하게 되면 실리콘이 팽창하며 변위를 갖게 된다. 이 때의 변위를  $d$ 라 하면  $d$ 는 식 (1)과 같이 표현된다[10,11].

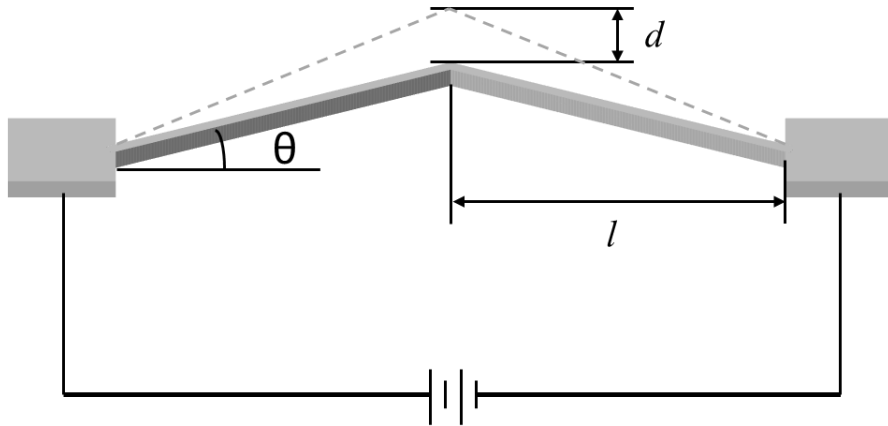


그림 2.1 Chevron beam 모식도

$$d = \sqrt{l^2 + 2(l) \cdot l' - l \cdot \cos^2 \theta} - l \cdot \sin \theta \dots \dots \dots (1)$$

여기서  $l$ 은 beam 한 개의 길이이며,  $l'$ 은 열팽창으로 인해 늘어난 beam 한 개의 길이이다. 그리고  $\theta$ 는 전압을 인가하기 전에 구조적으로 가지고 있는 pre-bent angle이다. 여기서 beam의 개수를 병렬로  $n$ 배 늘리게 되면 변위 역시  $n$ 배로 늘어나게 된다[12].



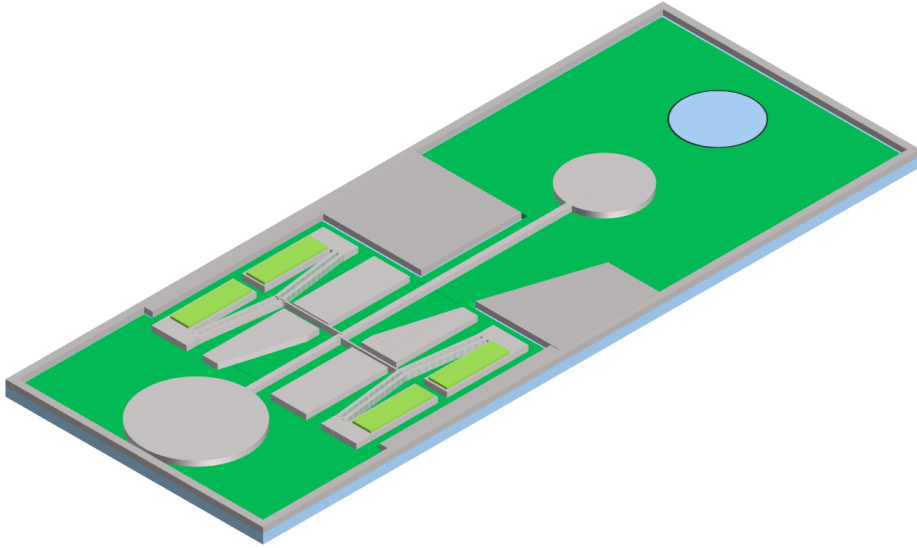


그림 2.2 Misaligned 구조를 가지는 electro thermal two phase aperture

본 절에서 제안하는 chevron beam을 이용한 구조는 그림 2.2와 같다. Main beam 양쪽에 셔터 기능을 하는 원판과 동작 중 beam의 균형을 맞추기 위한 원판이 위치하고 있으며 main beam은 bent beam 두 개로 구성된 chevron beam을 통해 변위를 전달해주는 두 개의 chevron output beam에 연결되어 있다.

Chevron beam 양쪽에 달린 전극 패드에 각각 DC 전압과 그라운드가 연결되면 두 패드 사이로 chevron beam을 통해 전류가 흐르게 된다. 이 때의 전류를  $I$ , 전극 패드 사이의 저항을  $R$ 이라고 한다면 가해지는 전력  $P$ 는 식 (2)와 같이 표현 가능하다.

$$P = \frac{V^2}{R} \dots\dots\dots (2)$$

Chevron output beam은 양 단에 연결된 전압이 같으므로 output beam을 통해 전류가 흐르지 않으므로 전력이 beam을 가열시키는 열로 모두 전환되었다고 가정하면 beam이 받는 열량은 식 (3)과 같이 표현할 수 있다.

$$Q = P \cdot t = c \cdot m \cdot \Delta T \dots\dots\dots (3)$$

여기서  $Q$ 는 열량,  $P$ 는 전력,  $c$ 는 실리콘의 비열,  $m$ 은 실리콘 구조물의 질량,  $\Delta T$ 는 열량으로 인해 증가한 구조물의 온도 변화량이다. 그리고 온도가  $\Delta T$ 만큼 증가 했을 때, 전체 부피  $V$  대비 변화하는 부피  $\Delta V$ 의 비율은 열팽창계수  $\alpha_V$ 와  $\Delta T$ 로 식 (4)와 같이 표현 가능하다.

$$\frac{\Delta V}{V} = \alpha_V \Delta T \dots\dots\dots (4)$$

또한 제작하고자 하는 구조물에서 팽창하는 부분의 beam은 길이와 폭이나 높이에 비해 수십 배~수백 배 길기 때문에, 길이 방향 외 다른 방향으로 팽창하는 부피는 거의 무시할 수 있다고 가정한다. 이와 같이 가정할 경우, 위의 부피에 대한 열팽창 식을 식 (5)와 같이 길이에 대한 열팽창 식으로 나타낼 수 있다[13].

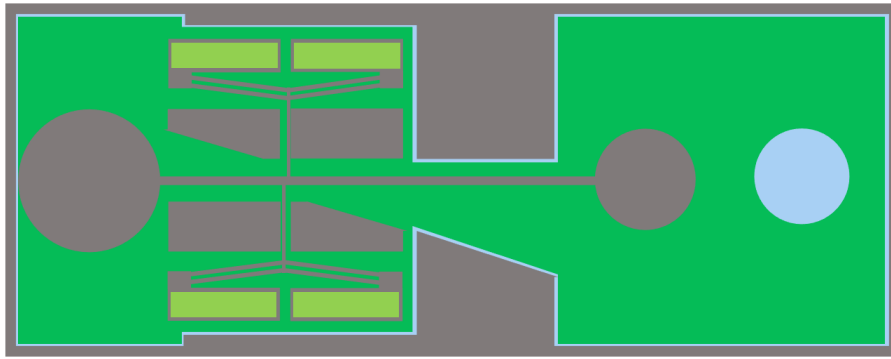
$$\frac{\Delta L}{L} = \alpha_L \Delta T \dots\dots\dots (5)$$

Chevron beam에 흐르는 전류가 줄열을 발생시켜 열팽창계수와 온도에 비례해 chevron beam을 팽창시키게 된다. Chevron beam이 팽창함에 따라 연결된 chevron output beam에 변위가 전달되게 된다. 이렇게 전달되는 선형적인 변위는 main beam에 연결된 output beam의 misalignment로 인해 셔터가 시계 방향으로 회전하며 더 큰 변위로 움직이게 한다.

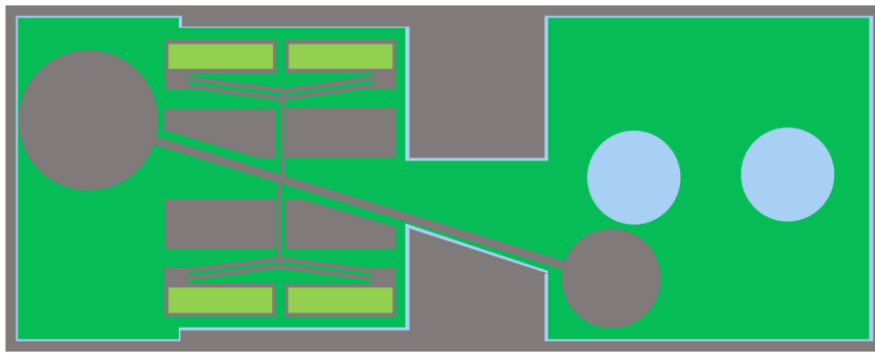
전압 인가 전 후 소자의 모습은 그림 2.3과 같다. 그림 2.3(a)와 같이 조리개가 전압이 인가되지 않아 닫혀있는 상태에서는 한 개의 조리개로 이미지 정보를 얻게 되고, 그림 2.3(b)와 같이 전압이 가해져 aperture가 완전히 열리게 되면 두 개의 조리개로 이미지를 얻게 된다. 이처럼 On/Off 두 상태에서 얻은 단안시, 양안시의 이미지 차이를 비교하여 영상에 대한 정보를 분석할 수 있게 된다[14].

또 다른 방법으로는 셔터를 링 형태로 바꾸어 구조물을 제작하게 되면 양안시, 단안시 형태의 거리 추출이 아닌 한 개의 open된 lens system을 통해 aperture 직경의 크기, 즉 F-number의 차이에 따라 발생하는 blur 차이 및 depth map을 통한 거리 추출 방식으로도 응용이

가능하다[15-17].



(a)



(b)

그림 2.3 조리개 동작 모식도, 전압 인가 (a)전 (b)후

그림 2.4는 Dual Aperture사에서 출원한 서로 다른 크기의 aperture를 통해 얻어진 이미지를 처리하는 기술에 대한 특허 중 일부이다[18]. 두 개의 aperture가 광축상에 나란히 존재하고 있으며 각각의 aperture는 가시광선과 적외선을 통과 시키는 역할을 한다. 이때의 aperture의 크기는 가시광선용 aperture의 지름 크기는 1.32mm, 적외선용 aperture의 지름 크기는 0.62mm이다. 이를 기준으로 삼아 실제 출원된 특허에 적용한다고 하였을 때, 최소 0.62mm의 지름을 가지는 셔터가 필요하므로 셔터의 지름을 0.65mm로 설정하였다.

그리고 셔터만이 한 쪽에 위치할 경우 구조물이 셔터 쪽으로 기울어 기관에 닿아 끌릴 수가 있기 때문에 반대편에 더미 역할을 하는 원형

구조물을 배치하였다. 그리고 지렛대의 원리를 이용해 구조물의 변위를 최대화하기 위해 셔터의 중심으로부터의 output beam까지의 거리가 더미의 중심으로부터의 output beam까지의 거리가 2배가 되도록 설정하였다. 중심으로부터의 거리가 2배 차이가 나기 때문에 더미의 무게는 셔터 무게의 약 2배가 되도록 지름을 셔터 지름의 1.4배인 0.91mm로 설정하였다.

중심으로부터의 거리 차를 더 크게 할수록 셔터의 움직임을 더 크게 할 수 있지만 소자 전체의 크기가 따라서 증가하기 때문에 거리 차를 더 크게 만들지 않고 2배의 비율을 갖도록 설정해주었다.

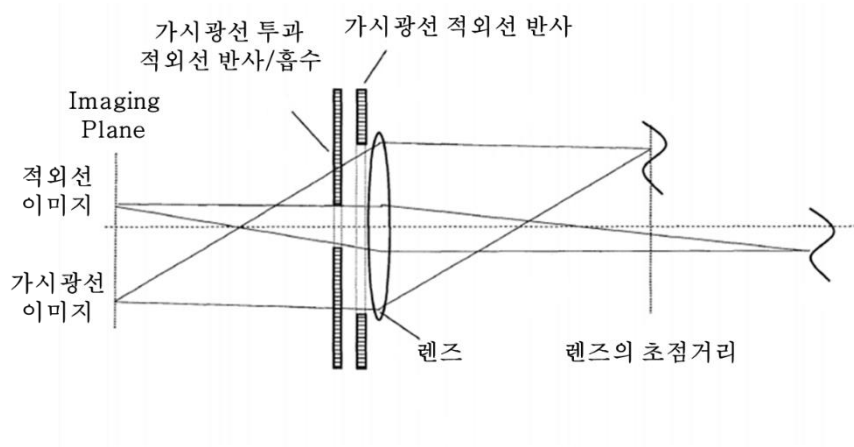


그림 2.4 Dual aperture사의 multi-aperture를 이용한 이미지 처리[18]

## 2.2 시뮬레이션

설계한 구조에서 생성되는 변위에 영향을 미칠 수 있는 주요 변수들과 변위 사이의 관계를 알아보기 위하여 ANSYS APDL(ver 16.0)로 시뮬레이션을 진행해 각 변수들의 dimension을 설정하였다. Cr 전극 패드의 경우 그 두께가 100nm로 실리콘의 두께에 비해 매우 얇기 때문에 시뮬레이션에서 제외하고 진행하였다.

먼저 사용하고자 하는 물질의 각 특성에 대하여 표 2.1과 같이 입력해준 뒤, 구조물의 부피를 설정해주었다[19,20]. 이후 설정된 전체 부피에 대하여 메쉬를 지정해주었으며, chevron beam에 해당하는 부피에 인가하고자 하는 전력이 들어가도록 시뮬레이션을 진행하였다. 입력된 전력으로 인해 시뮬레이션 상에서 chevron beam의 팽창이 나타나게 되고 결과적으로 전체 구조물의 동작 및 생성변위에 대한 시뮬레이션 결과를 얻게 된다.

Material Properties							
	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Young's Modulus (GPa)	Shear Modulus (GPa)	Poisson's Ratio	Thermal Expansion Coefficient ( $\mu\text{m/m} \cdot \text{K}$ )	Thermal Conductivity (W/m $\cdot$ K)	Permittivity
Si	2330	168.9	66.9	0.262	2.612	150	11.7

표 2.1 시뮬레이션에 사용한 Silicon 특성

### (가) Pre-bent angle of chevron beam VS Displacement

Chevron beam이 변위를 생성하기 위해서는 전압을 가하기 전부터 동작하고자 하는 방향으로 꺾여있어야 열팽창으로 인해 형성되는 변위 한 방향으로 생성된다. 변위를 한 방향으로 생성하기 위한 pre-bent angle의 크기와 변위 사이의 관계에 대한 시뮬레이션은 그림 2.5와

같다.

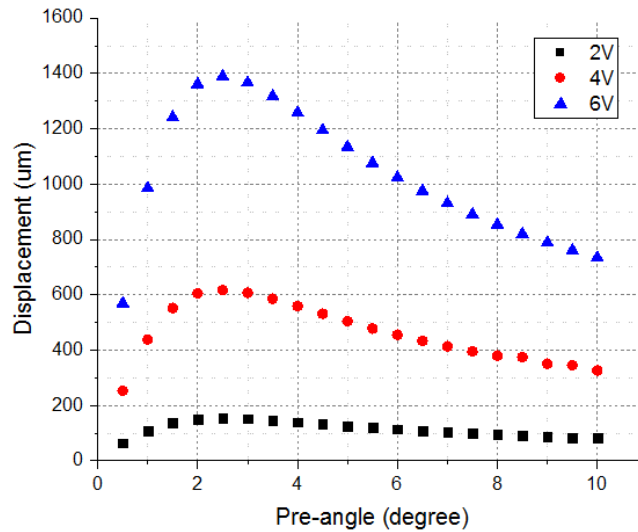


그림 2.5 Chevron beam의 pre-bent angle과 displacement의  
시뮬레이션

인가 전압을 2V, 4V, 6V에 대해 pre-bent angle을 1°에서 10°까지 0.5° 간격으로 변화시켜가며 변위에 대해 시뮬레이션을 진행하였다. 초기에는 각도가 점점 커짐에 따라 변위가 크게 증가하다가 2°~2.5° 사이에서 최대값을 가진 후 점차 감소한다.

#### (나) Beam width VS Displacement

전류가 흐르면서 발생하는 열에 의해 가장 직접적으로 영향을 받는 beam은 열팽창하는 chevron beam과 그로 인해 변위를 얻는 chevron output beam이다. 이에 대한 시뮬레이션 결과는 그림 2.6과 같다.

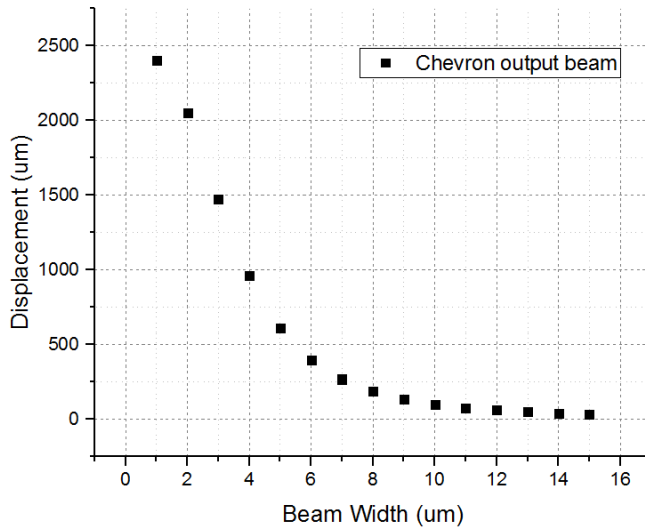
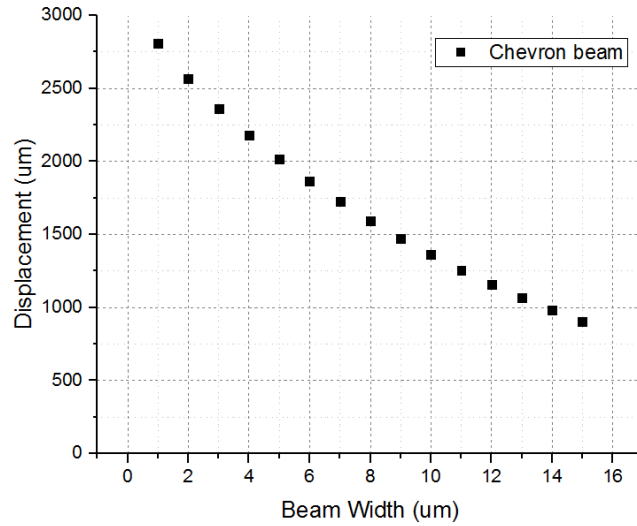


그림 2.6 Chevron beam과 chevron output beam의 width와 displacement의 시뮬레이션

Chevron beam width와 chevron output beam의 width를  $1\mu\text{m}$ 부터  $15\mu\text{m}$ 까지  $1\mu\text{m}$  간격으로 변화시켜가며 변위에 대해 시뮬레이션을 진행하였고  $0.1\text{W}$ 의 전력을 일정하게 인가해주었다. 변위는 beam width가 넓어질수록 감소하게 된다.

이러한 경향성을 보이는 것은 chevron beam의 경우 beam width가 넓어지게 되면 beam의 단면적이 넓어지게 되면서 전극 패드 사이의

전체적인 beam의 저항이 감소하게 되고 같은 전압을 가할 때, 얻을 수 있는 줄 열이 감소하게 되어 생성되는 변위는 감소하게 된다.

그리고 chevron output beam의 경우 main beam에 연결되어 있어 전압이 인가됨에 따라 원위치에서 휘어지며 변위를 얻게 된다. 그런데 beam이 두꺼워짐에 따라 rigidity가 증가하여 chevron output beam의 휘어짐에 제약을 주게 되어 변위는 감소하게 된다.

#### (다) Misalignment VS Displacement

두 개의 chevron output beam을 main beam에 misalignment를 가지도록 배치하였는데, 어느 정도의 misalignment에서 가장 큰 변위를 얻을 수 있는지 simulation을 진행하였으며 그 결과는 그림 2.7과 같다.

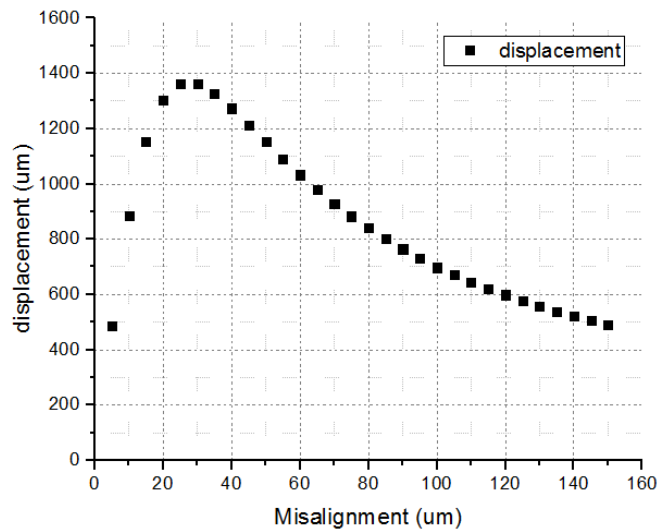


그림 2.7 Chevron output beam간의 misalignment와 displacement의 시뮬레이션

Chevron output beam 간의 misalignment에 대하여  $5\mu\text{m}$ 부터  $150\mu\text{m}$ 까지  $5\mu\text{m}$  간격으로 시뮬레이션을 진행하였으며  $0.1\text{W}$ 의 전력을 일정하게 인가하여 주었다. Misalignment가 증가할수록 점차 변위가



증가하다가  $30\mu\text{m}$ 에서 최대값을 보인 후 다시 감소하는 모습을 보인다.

이러한 경향성을 보이게 되는 이유는 output beam이 서로 misalign되어있지 않은 상태에서는 변위가 생성되지 않다가, 하나의 output beam이 main beam에 연결된 위치를 받침점, 다른 output beam이 연결된 위치를 힘점으로 보면 misalignment가 생기기 시작하며 지렛대의 원리에 따라 변위를 갖게 된다. Misalignment가 작을수록 같은 힘으로 생성할 수 있는 변위가 크지만 main beam의 뒤틀리지 않으려 저항하는 힘 역시 크다. 그리고 misalignment가 증가함에 따라 지렛대의 원리에 의해 생성할 수 있는 변위와 저항하려는 힘 역시 작아지게 되고 이 두 요소가 합쳐져 변위를 최대화 시킬 수 있는 최적의 misalignment를 갖게 된다.

#### (라) Voltage VS Displacement

위 시뮬레이션 결과들을 종합하여 표 2.2와 같이 각각의 dimension을 설정하였고 이에 대해 전압에 따른 변위에 대한 시뮬레이션 결과는 그림 2.8과 같다.

변수	수치
Pre angle	$2^{\circ}$
Chevron beam width	$10\mu\text{m}$
Chevron output beam width	$3.2\mu\text{m}$
Misalignment	$30\mu\text{m}$

표 2.2 시뮬레이션을 통해 결정된 구조물의 dimension

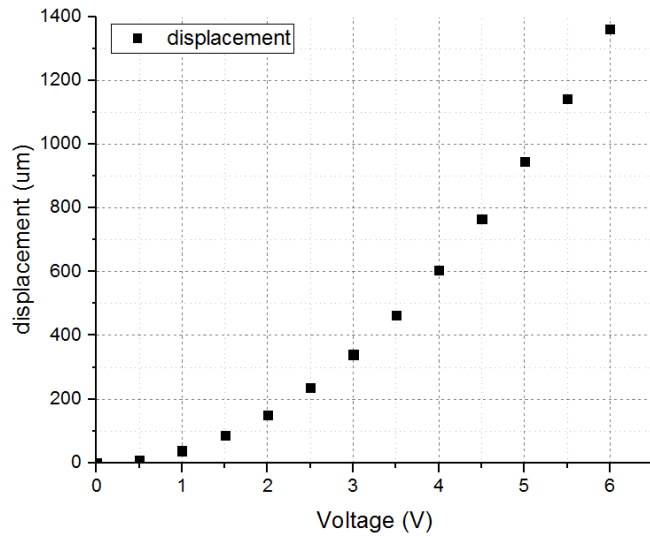


그림 2.8 설정 된 dimension의 전압과 변위에 대한 시뮬레이션

## 제 3 장 제 작

### 3.1 제작 순서

본 논문에서 제안한 misaligned chevron output beam을 통해 움직이는 electro thermal two phase actuator를 제작하기 위하여 4인치 단면 폴리싱 된 p-type (111) 실리콘 웨이퍼와 4인치 글래스 웨이퍼(Borofloat 33)를 사용하여 서울대 반도체공동연구소에서 공정을 진행하였다. 공정에 사용된 장비는 표 3.1에 장비특성과 함께 정리하였다. 실리콘 구조물을 형성하기 위하여 2장의 마스크를 이용하여 2번의 노광 공정을 진행하였으며, 실리콘 구조물의 전극 패드 형성과 글래스 웨이퍼에 크롬 패턴 형성을 위해 2장의 마스크를 이용하여 2번의 노광 공정을 진행하였다.

사용된 재료 및 장비	모델 명 (제조회사)	장비특성
SRN sputter	SRN-120(SORONA)	Cr, Al, Ti, Mo, Ni 증착 가능
Deep Si Etcher	Versaline (PLASMA-THERM)	Si substrate etch, 관통 공정 가능
RIE etcher	RIE 80 Plus (Oxford Instrument)	Cr, Al, Au, SiO <sub>2</sub> , Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> etch 공정 가능
Aligner	MA-6(Karl-suss)	파장 365nm 단색광
감광막	AZ5214 AZ4620	AZ5214-Positive AZ4620-Positive

표 3.1 제작에 사용된 장비

그림 3.1의 공정 흐름도에서 첫 단계는 DRIE 장비를 사용하여 단면 폴리싱 된 4인치 p타입 (111) 실리콘 웨이퍼에 AZ4620 감광막을 식각 마스크로 이용하여 cavity 패턴을 형성하는 것이다.

실리콘 웨이퍼 공정 이후 글래스 웨이퍼에 SRN sputter 장비를 사용하여 100nm 두께의 Cr 막을 증착 한다. 증착 된 Cr 막에 AZ5214를 식각 마스크로 RIE etcher 장비를 사용하여 Cr 패턴을 형성한다.

패턴이 형성된 실리콘 웨이퍼와 글래스 웨이퍼를 패턴이 형성된 면끼리 마주하도록 양극 접합을 진행한다. 이 때 실리콘 웨이퍼와 글래스 웨이퍼 사이의 패턴으로 인해 형성된 cavity는 진공상태가 되도록 접합을 진행하였다.

접합된 웨이퍼의 실리콘 면을 형성하고자 하는 구조물의 두께에 맞추어 각각  $54\mu\text{m}$ ,  $60\mu\text{m}$ ,  $66\mu\text{m}$ 를 target으로 CMP(Chemical Mechanical Polishing) 공정을 진행한다. 이렇게 CMP가 진행될 경우 구조물의 두께는 각각  $25\mu\text{m}$ ,  $30\mu\text{m}$ ,  $35\mu\text{m}$ 가 된다.

CMP 공정이 진행된 실리콘 면에 전극 패드를 형성하기 위한 100nm 두께의 Cr 막을 증착한다. AZ5214를 식각 마스크로 RIE etcher 장비를 사용하여 전극 패드 패턴을 형성한다.

구조물을 release 시키기 위해 AZ4620을 식각 마스크로 DRIE 장비에서 실리콘 식각 공정을 진행한 뒤 웨이퍼를 ST2000, 아세톤, IPA에 순서대로 담가 감광막을 제거해 공정을 완료한다.

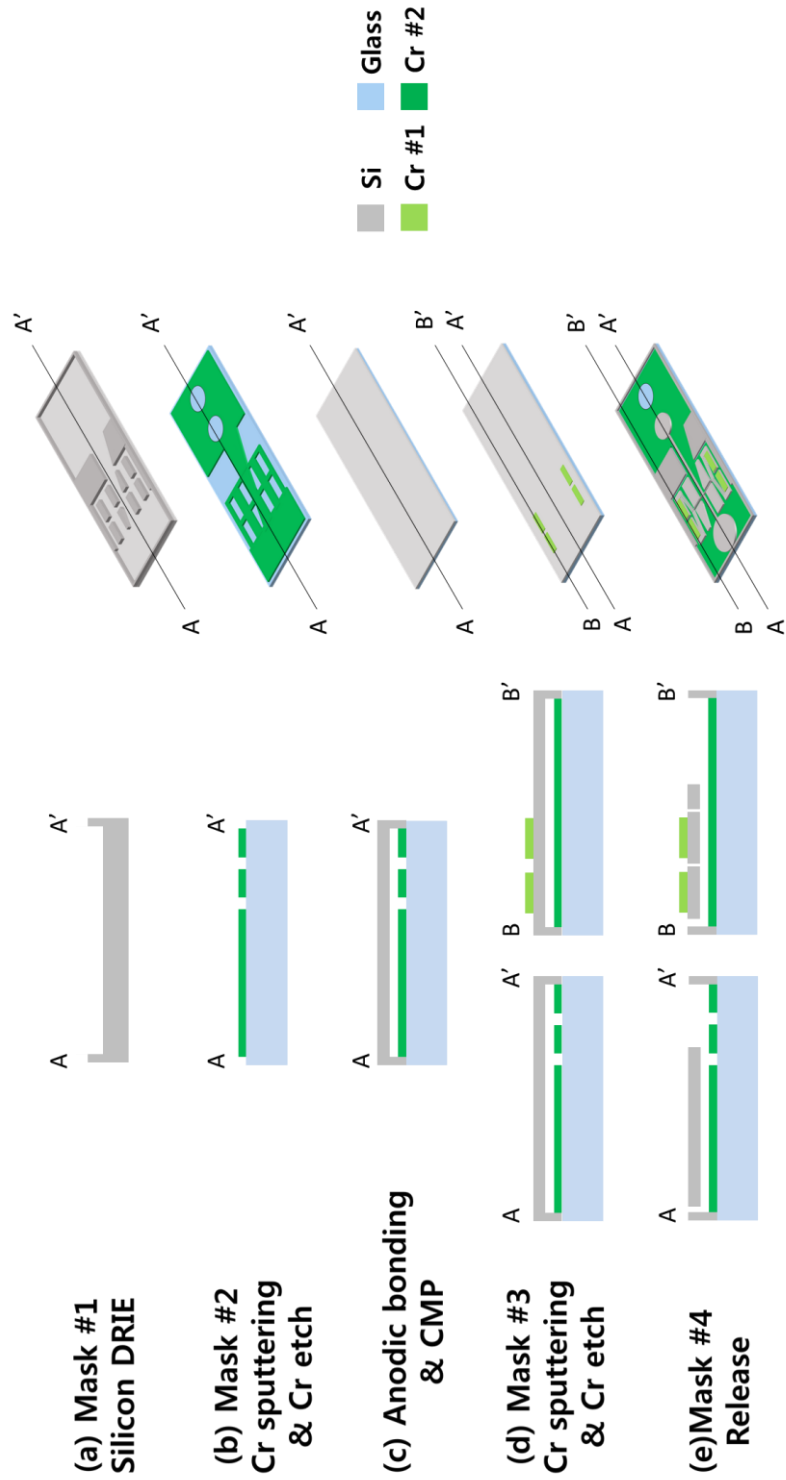


그림 3.1 단면도와 입체 그림을 이용해 나타낸 공정 흐름도

## 3.2 제작 결과

4인치 p-type (111) prime grade 실리콘 웨이퍼 4장과 Schott사의 Borofloat33 글래스 웨이퍼 3장을 SPM( $\text{H}_2\text{SO}_4$ :  $\text{H}_2\text{O}_2$  = 4:1) cleaning을 15분간 진행하였다. 동시에 트위저도 SPM 용액에 30초간 담근 후 DI water,  $\text{N}_2$  gun으로 cleaning을 진행하여 후속 공정에서 트위저로 인한 유기물 오염을 방지한다. 이후 bath type wet station에서 QDR(Quick Dump Rinsing)을 진행하였다. QDR이 끝난 웨이퍼를 Rinse & Dryer에서 건조 공정을 진행하였다. 건조 공정은 표 3.2와 같은 순서로 진행된다.

Step	Time	Speed
Rinse	30 sec	500 rpm
Purge	30 sec	500 rpm
Dry 1	180 sec	1800 rpm
Dry 2	240 sec	500 rpm

표 3.2 Rinse Dry 공정

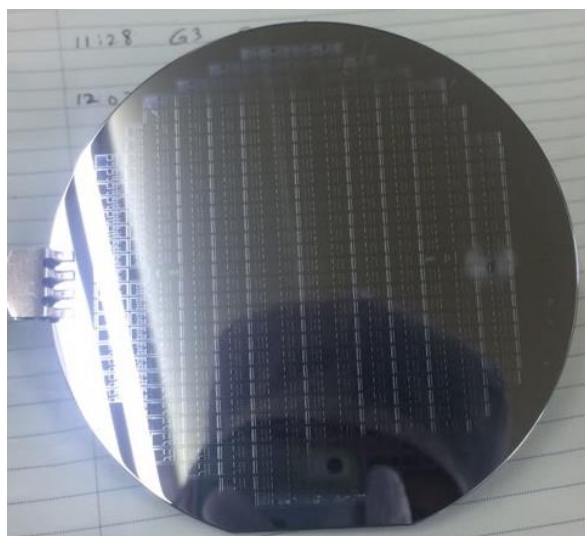


그림 3.2 패터닝이 완료된 실리콘 웨이퍼

실리콘 웨이퍼 DRIE 공정과 cleaning까지 진행된 결과는 그림 3.2와 같다. 양극 접합 공정을 통해 실리콘 웨이퍼와 글래스 웨이퍼 경계에 cavity를 형성하기 위해 실리콘과 감광막의 식각 선택비가 1:50~1:100임을 고려하여 두께  $6\mu\text{m}$ 의 PR AZ4620를 식각 마스크로 사용하여 식각하였다.

AZ4620으로  $6\mu\text{m}$  두께를 형성하는 공정 방법은 표 3.3과 같다. 웨이퍼와 감광막의 접착력 강화를 위해 먼저 웨이퍼 표면을 확인하여 파티클이 있을 경우  $\text{N}_2$  gun으로 불어준 뒤, HMDS를 표면에 도포한 후 스핀 코팅을 500 rpm에서 10초간 진행한다. 감광막 역시 도포 후 500 rpm 10초, 5000 rpm 35초 진행한다.

소프트 베이크 공정 중 또는 웨이퍼 이동 중 먼지가 웨이퍼 표면에 붙을 수 있으므로 노광 공정 진행 직전에  $\text{N}_2$  gun으로 웨이퍼 표면을 불어 먼지가 붙어있지 않음을 확인하고 노광 공정을 진행하였다. 사진 공정 후 AZ300 현상액에 웨이퍼를 담근 상태에서 2분간 흔들어 주어 웨이퍼의 감광막 패턴을 현상한 뒤, DRIE 장비를 이용하여  $30\mu\text{m}$  단차를 가지도록 식각하였다.

HMDS 도포	500 rpm 10초
스핀 코팅	500 rpm 10초, 5000 rpm 35초
소프트 베이크	$110^\circ\text{C}$ / 150초
노광	17mW/s / 30.9초
현상	AZ 300 / 270초
하드 베이크	$110^\circ\text{C}$ / 180초

표 3.3 AZ4620을 이용한 양각 사진 공정 조건

이후 Olympus사의 depth measurement 장비(모델명 STM6)를 사용하여 각 웨이퍼의 9개 포인트의 좁은 패턴과 넓은 패턴의 단차를 측정하였고 결과는 표 3.4에 정리하였다. 이 중에서 가운데 5개 포인트의 단차 역시 별도로 표 3.4에 정리해 서터가 형성될 넓은

패턴의 단차를 기준으로 삼아 CMP 공정의 타겟에 반영하여 적용하였다.

첫 번째 웨이퍼의 경우 넓은 패턴의 가운데 다섯 point의 단차의 평균이  $29.34\mu\text{m}$  이므로 반올림하여  $29\mu\text{m}$ 를 구조물의 두께  $25\mu\text{m}$ 를 더해  $54\mu\text{m}$ 로 CMP 타겟을 설정하였다. 두 번째 웨이퍼의 경우 단차의 평균  $30.40\mu\text{m}$ 를 반올림하여  $30\mu\text{m}$ 에 구조물의 두께  $30\mu\text{m}$ 를 더하여 CMP 타겟을  $60\mu\text{m}$ 로 설정하였다. 마지막 세 번째 웨이퍼는 다섯 개의 단차 평균이  $30.82\mu\text{m}$ 를 반올림하여  $31\mu\text{m}$ 에 구조물의 두께  $35\mu\text{m}$ 를 더하여  $36\mu\text{m}$ 를 CMP 타겟으로 설정하였다.

단위 : $\mu\text{m}$		C	CT	CB	CL	CR	5 point 평균	표준 편차
1	W	29.1	29.1	29.2	29.4	29.9	29.34	0.34
	N	29.7	29.9	29.6	29.5	30.2	29.78	0.28
2	W	30.4	31	30.9	30.4	31.4	30.40	0.73
	N	30.4	30.8	31	30.3	31.6	30.56	0.84
3	W	29.2	30.9	30.8	30.2	30.9	30.82	0.43
	N	29.3	31.1	31.3	30.1	31	30.82	0.52
단위 : $\mu\text{m}$		T	B	L	R		9 point 평균	표준 편차
1	W	32.3	33.6	32.3	32.6		30.83	0.34
	N	32.7	33.7	32.4	33		31.19	0.28
2	W	31.9	35.4	32.9	35.7		32.22	0.73
	N	32.1	35.7	32.8	36		32.30	0.84
3	W	32.7	34.6	33.2	33.7		31.80	0.43
	N	33.4	35.2	32.8	34.5		32.08	0.52

표 3.4 Depth measurement 장비로 측정한 웨이퍼별 9 포인트

단차(W: 넓은 패턴, N: 좁은 패턴)

테스트 웨이퍼 한 장을 식각한 후 식각률을 재계산하여 3장의 웨이퍼의 식각을 진행하였다. 테스트 웨이퍼는 DRIE 장비에서 총 45 loop의 공정이 진행된 후  $33.0\mu\text{m}$ 의 단차가 형성되었다. 식각률은  $0.73\mu\text{m/loop}$  이고, 이를 통해 이후 3장의 웨이퍼는 40 loop의 공정을



진행하였다. 그 결과는 표 3.5과 같다.

	테스트 웨이퍼	웨이퍼 #1	웨이퍼 #2	웨이퍼 #3
loop 수(회)	45	40	40	40
식각 깊이( $\mu\text{m}$ )	33.0	29.3	30.4	30.8
식각률( $\mu\text{m}/\text{loop}$ )	0.73	0.73	0.76	0.77

표 3.5 웨이퍼 별 식각 깊이와 식각률

그리고 표 3.6에서 macro loading effect에 대하여 확인할 수 있다. 그림 3.3에서 측정한 넓은 패턴의 경우 가로 세로 2.18mm의 정사각형 패턴이며, 좁은 패턴의 경우 가로 폭 160 $\mu\text{m}$ 의 패턴이다. 30 $\mu\text{m}$  깊이의 단차를 식각 하는 동안 목표 단차 대비 9 point 평균 각각 1.2%, 0.2%, 0.9% 정도의 차이를 보였다. 그리고 이 결과를 표 3.6에 정리하였다. Macro loading effect의 경우 그림 3.3처럼 패턴의 면적, 선폭이 넓을 때, 일정하게 공급되는 plasma radical의 양에 비해 식각해야 하는 패턴이 넓어 radical 양이 충분하게 공급되지 않아 식각률이 떨어지게 된다. 이러한 현상을 해결하기 위해서는 넓은 패턴에 dummy pattern을 형성하거나 공급되는 식각재의 유량을 늘리는 방법 등이 있다[21].

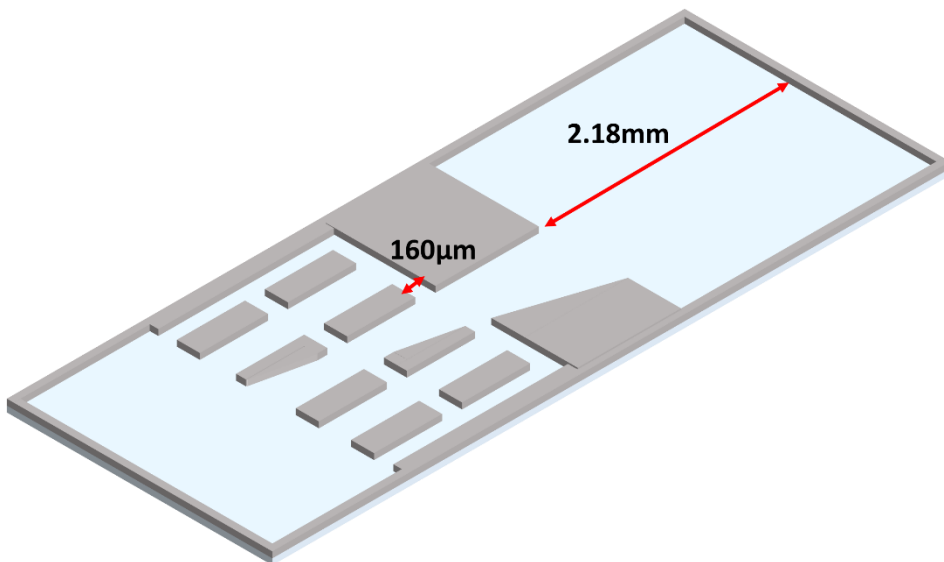


그림 3.3 측정한 넓은 패턴과 좁은 패턴의 위치

	웨이퍼 #1	웨이퍼 #2	웨이퍼 #3
단차 차이 ( $\mu\text{m}$ )	0.36	0.08	0.28
단차 차이 비율	1.2%	0.2%	0.9%

표 3.6 웨이퍼 별 패턴 사이즈에 따른 단차 차이

이후 글래스 웨이퍼 전면에 SRN sputter를 사용하여 Cr막을 100nm의 두께로 증착하였다. 공정 방법은 Cr 800W를 사용하였고 증착률 8Å/sec에서 125초 동안 증착하였다.

Cr 패터닝을 하기 위해 두께 1.8  $\mu\text{m}$ 의 PR AZ5214를 식각 마스크로 사용하였다. 두께 1.8  $\mu\text{m}$ 의 감광막을 형성하기 위한 공정 조건을 표 3.7에 정리하였다. 접착력을 강화 하기 위하여 HMDS를 도포한 뒤 사진 공정을 이용해 감광막을 패터닝 하였다.

HMDS 도포	500 rpm / 10초
스핀 코팅	500rpm 5초, 4000rpm 35초
소프트 베이킹	90°C / 90초
노광	17mW/s / 8.9초
현상	AZ 300 / 120초
하드 베이킹	115°C / 120초

표 3.7 AZ5214를 이용한 양각 사진 공정 조건

이후 RIE etcher 장비를 이용하여 Cr을 식각하여 패턴을 형성하였으며 Cr을 식각하기 위한 공정 조건은 표 3.8과 같다. 표 3.8의 조건으로 공정을 진행해 Cr 패턴 형성이 완료된 후 글래스 웨이퍼의 사진은 그림 3.4와 같다.

O <sub>2</sub>	20 sccm
Cl <sub>2</sub>	20 sccm
Pressure	100 mTorr
Forward Power	50W

표 3.8 RIE 장비의 Cr 식각 공정 조건



그림 3.4 패터닝이 완료된 글래스 웨이퍼

패턴 형성이 된 실리콘 웨이퍼를 SPM cleaning을 15분간 진행하였으며, 글래스 웨이퍼의 경우 SRN sputter로 증착된 Cr이 SPM cleaning시 수nm/min 정도의 식각률을 가지고 있어 15초간 SPM cleaning을 진행하였다[22]. 감광막을 모두 제거한 뒤, KIST의 나노팩센터에서 wafer bonder를 사용하여 웨이퍼를 양극 접합하였다. 접합 전 후 모습은 그림 3.5과 같다.

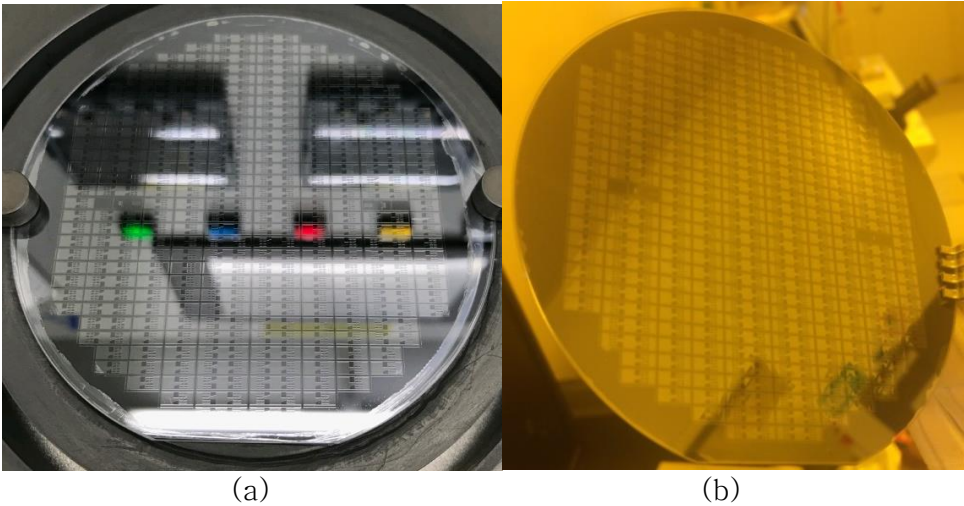


그림 3.5 실리콘 웨이퍼와 글래스 웨이퍼의 양극 접합 (a)전 (b)후

실리콘 웨이퍼의 두께를 각각  $54\mu\text{m}$ ,  $60\mu\text{m}$ ,  $66\mu\text{m}$ 만 남기고 CMP 공정을 진행하였으며, CMP 공정까지 완료한 모습은 그림 3.6과 같다.

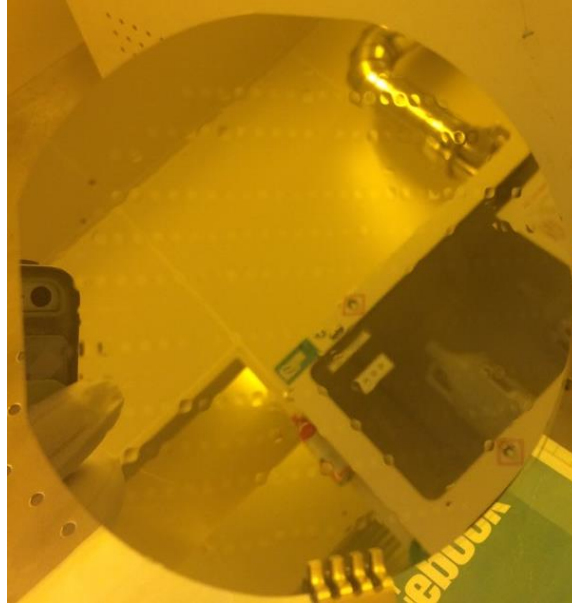


그림 3.6 접합된 웨이퍼의 CMP 공정 완료 후 실리콘 면

후속 공정 전 SPM cleaning을 15분간 진행해 웨이퍼 표면에 있을지 모르는 유기물, 파티클을 제거하고 SRN sputter를 사용해  $100\text{nm}$  두께의 Cr막을 실리콘 면에 증착하였다. 이후 PR AZ5214를 식각 마스크로 Cr막을 식각하여 전극 패드를 형성했다.

패드 형성이 완료된 후 다시 한 번 PR AZ4620을 사용하여 식각 마스크를 형성하고 DRIE 장비를 사용하여 구조물을 완전히 release 시켰다. 테스트 웨이퍼를 한 장 사용하여 식각률을 계산하여 공정을 진행할 loop 횟수를 결정하였다.

테스트 웨이퍼는 DRIE 장비에서 40 loop의 공정이 진행되는 동안 총  $21.5\mu\text{m}$ 의 식각이 진행되었다. 이를 통해 식각률을 계산한 결과는  $0.54\mu\text{m}/\text{loop}$  이며 이를 표 3.9에 정리하였다.

	테스트 웨이퍼
loop 수(회)	40
식각 깊이( $\mu\text{m}$ )	21.5
식각률( $\mu\text{m}/\text{loop}$ )	0.54

표 3.9 테스트 웨이퍼의 식각 깊이 및 식각률

그리고 앞서 같은 장비로 진행한 실리콘 DRIE 공정과 비교해보았을 때, 식각률이  $0.73\mu\text{m}/\text{loop}$ 에서  $0.54\mu\text{m}/\text{loop}$ 로 약 26.0%가량 감소하였다. 이는 DRIE 장비의 공정 조건이 장비 챔버내에 실리콘 웨이퍼만이 들어간 상태를 기준으로 맞춰져 있는 것이 그 원인이다. Release 단계의 DRIE 공정에서는 장비 챔버내에  $500\mu\text{m}$  두께의 글래스 웨이퍼 위에 약  $60\mu\text{m}$  두께의 실리콘이 접착되어 있는 상태로, 실리콘을 식각하기 위한 plasma를 끌어당기는데 쓰이는 RF power 및 공정 중 가열된 웨이퍼의 온도를 시켜주는 He 가스를 통한 쿨링이 글래스 웨이퍼를 통해 제대로 전달되지 않으면서 식각률에 있어 큰 하락을 가져오게 되었다.

Release 단계의 경우 서터와 더미 질량을 지지하고 있는  $20\mu\text{m}$  두께의 beam과  $3.2\mu\text{m}$  두께의 chevron output beam이 식각 공정 중에 부러질 위험이 있어 앞서 테스트 웨이퍼로 계산된 식각률을 통해 결정한 loop 횟수보다 10% 적게 진행하고 웨이퍼를 꺼내어 구조물을 확인하였다. 광학 현미경으로 구조물의 상태를 확인한 뒤 depth measurement로 단차의 깊이를 확인해 5 loop 이하로 짧게 공정을 반복하며 release를 완료하였다. 각 wafer의 식각해야하는 깊이와 그에 따른 첫 공정 loop수는 표 3.10과 같다.

	웨이퍼 #1	웨이퍼 #2	웨이퍼 #3
구조물 두께( $\mu\text{m}$ )	25	30	35
예상 loop 수(회)	46	56	65
1차 DRIE 공정 횟수(회)	41	50	58

표 3.10 웨이퍼별 구조물 두께 및 1차 DRIE 공정 횟수

식각 공정이 완료된 후 release된 구조물의 stiction이나 파손을 방지하기 위해 감광막 제거시 휘젓거나 흔드는 것 없이 hot plate에서 80°C까지 가열한 감광막 제거제 ST2000에 웨이퍼를 담가두고 이후 acetone 15분, IPA 15분 담가두었다. ST2000의 경우 감광막의 제거 정도에 따라 담그는 시간을 조절하였다. IPA가 완전히 증발한 후 depth measurement로 구조물을 관찰하여 웨이퍼 상에 감광막이 아직 남아 있을 경우 이 과정을 반복하였다.

그림 3.7은 release를 위한 식각 공정이 진행된 웨이퍼를 80°C의 ST2000에 1시간, acetone 15분, IPA 15분 담가둔 뒤 감광막을 소자의 모습과 이를 비교하기 위해 모식도와 함께 나타낸 것이다. 구조물의 밑으로 검은색 그림자가 확인되는 것으로 완전히 구조물이 release가 되었음을 확인할 수 있다.

이후 추가적으로 감광막을 제거하기 위한 cleaning을 진행하였으며 광학현미경으로 웨이퍼 전체 표면을 관찰하여 확인한 뒤 cleaning을 종료하였다.

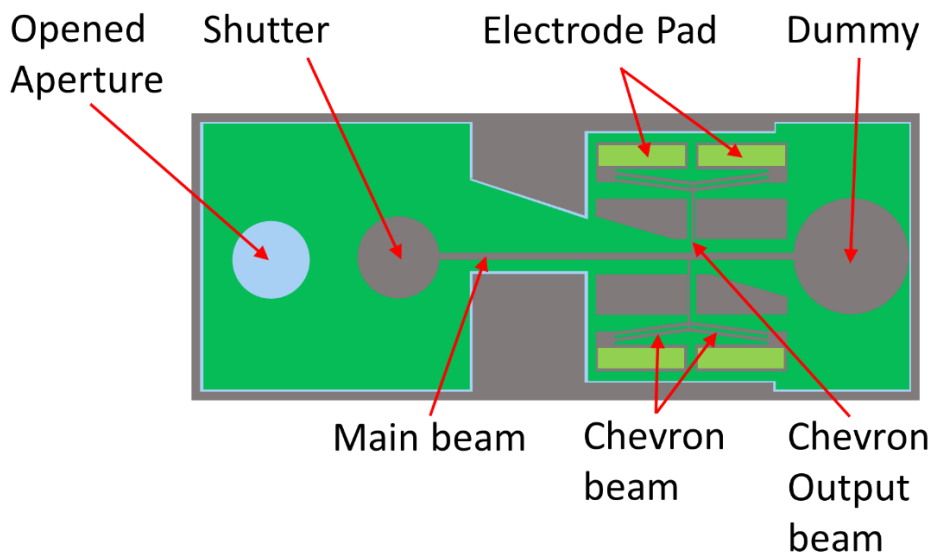
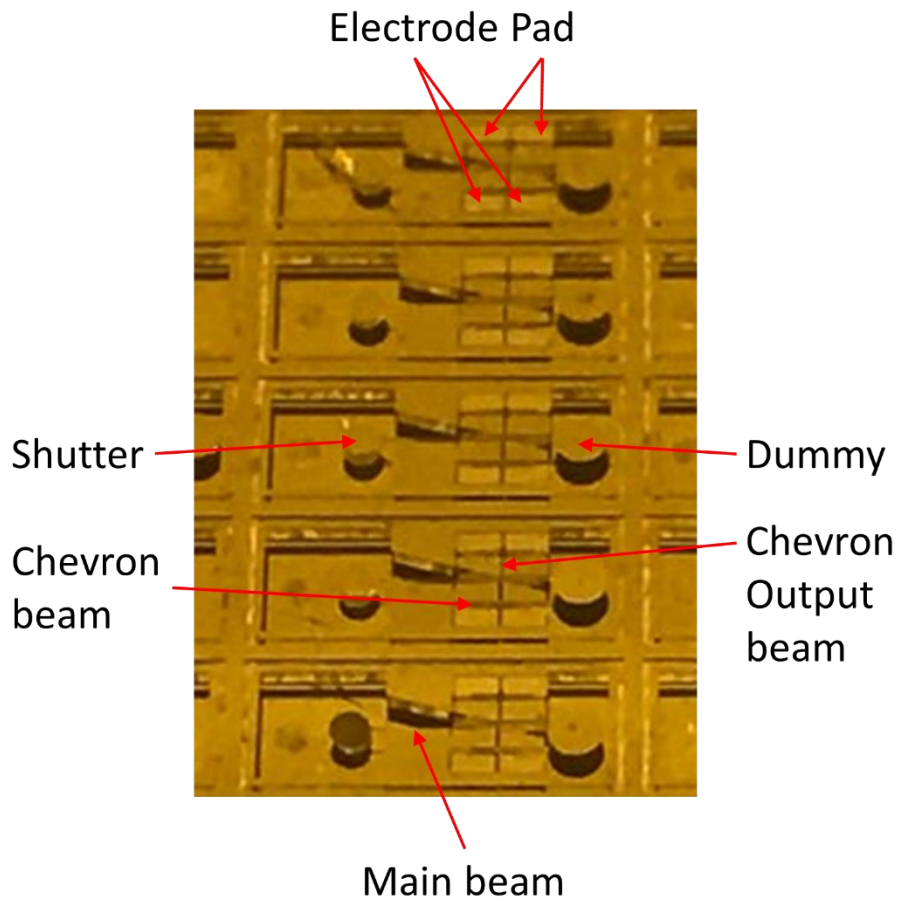


그림 3.7 Release 공정 후 형성된 실리콘 구조물과 모식도

## 제 4 장 측 정

### 4.1 측정 set up

제작된 구조물의 DC 동작 특성을 확인하기 위하여 probe station을 이용한 측정 환경을 그림 4.1과 같이 구성하였다. 한 구조물에 부착되어 있는 4곳의 Cr 패드중 좌측 2개의 패드에 DC power supply (+)극으로부터 연결된 probe tip를 연결해주고 우측 2개의 패드에 ground로부터 연결된 probe tip를 연결해주었다. Probe tip으로는 직경 2mm의 gold probe tip를 사용하였다.

DC power supply에서 probe tip를 통해 Cr 패드에 DC 전압을 인가해주어 이를 통해 chevron beam에 전류가 흐르게 되고 전류가 흐르며 실리콘 구조물의 저항에 의해 발생한 줄열에 의해 chevron beam이 팽창해 pre-bent angle로 인해 꺾인 방향으로 변위를 생성해 output beam에 전달하게 된다. Misalign된 output beam이 각각 변위를 전달받아 main beam을 시계방향으로 회전시키게 되고 main beam에 연결된 셔터가 열리게 된다. 0V부터 셔터 부분이 완전히 열릴 때까지 1V 간격으로 상승시키며 현미경을 통해 변위를 관찰 및 측정한다.



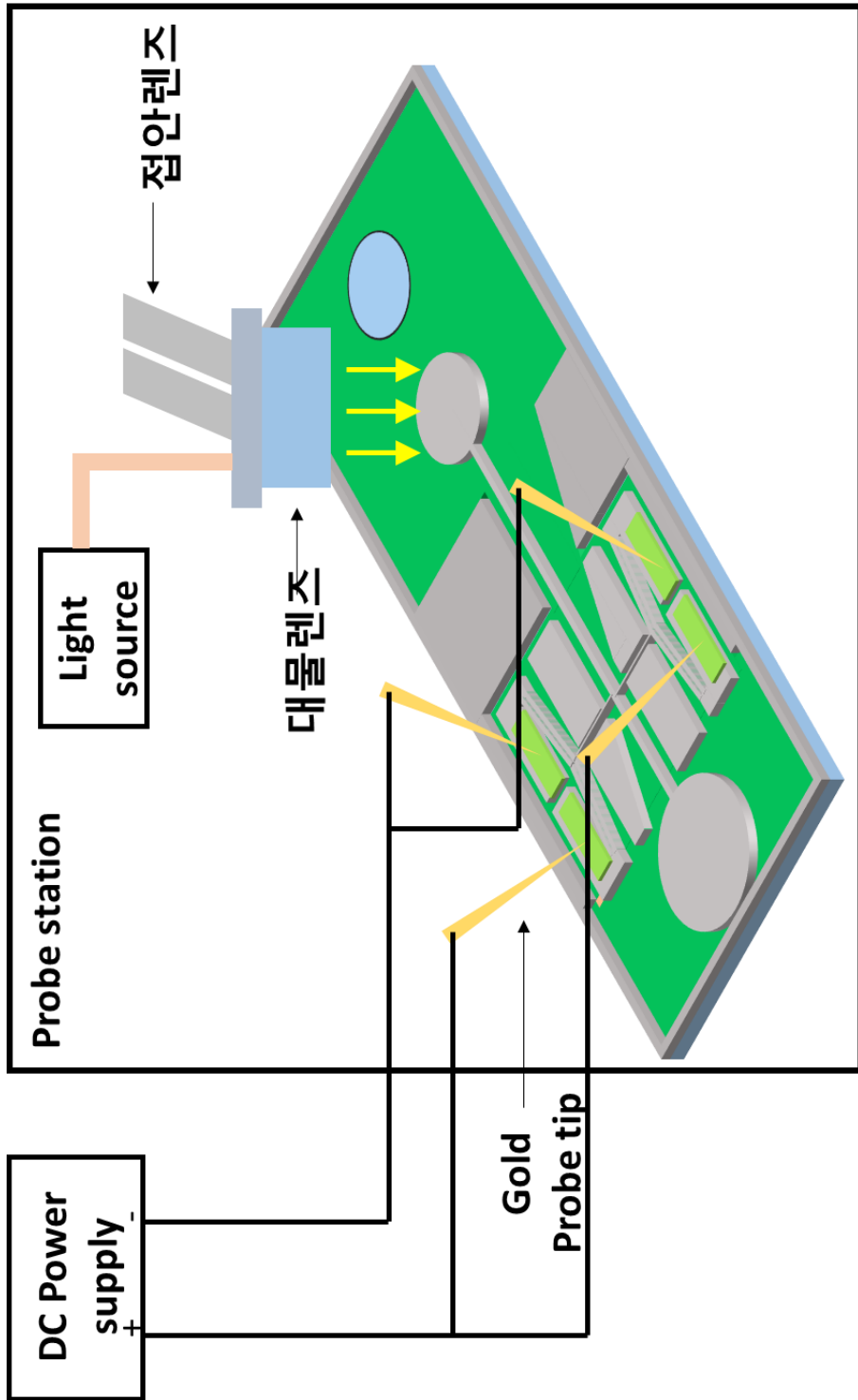


그림 4.1 측정 셋업 모식도

## 4.2 DC 동작 특성 측정

전압을 0V부터 30초 간격으로 1V씩 올리며 변위를 측정하였다. 그림 4.2와 같이 셔터가 완전히 열릴 경우 잔류 열을 고려하여 1분 간격으로 1V씩 내리며 변위를 측정한다.

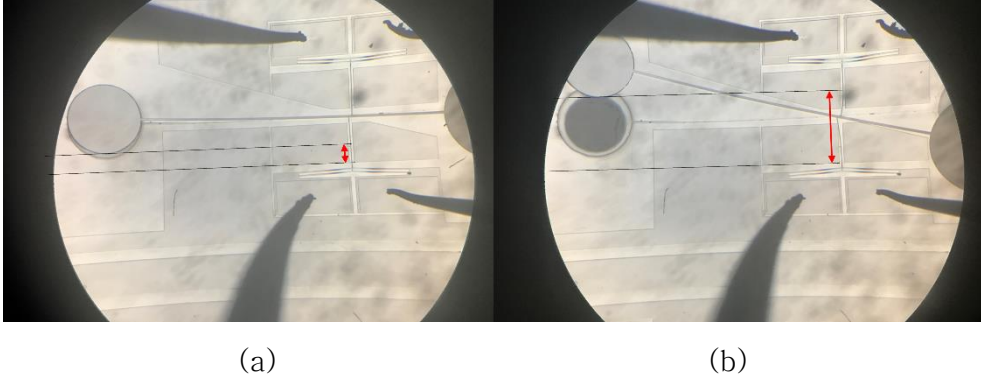


그림 4.2 전압이 인가되기 (a)전, (b)후 실리콘 구조물의 모습

이후 촬영한 사진에서 0V부터 DC 전압이 인가 되었을 때 픽셀 수의 차이(그림 4.2의 붉은 색 화살표)를 구한 뒤 식 4.1과 같이 depth measurement로 측정한 패턴 길이와 픽셀 수의 비례식으로부터 셔터의 실제 움직인 거리를 간접적으로 계산한다. 여기서  $N_{unknown}$ 은 셔터가 움직인 픽셀 수 이며,  $N_{known}$ 은 같은 사진 내에서 측정을 통해 길이를 알고 있는 구조물의 픽셀 수이고  $d_{known}$ 은 측정한 구조물의 실제 길이 이다.

$$\text{displacement} = \frac{N_{unknown}}{N_{known}} \cdot d_{known} \cdots \cdots (1)$$

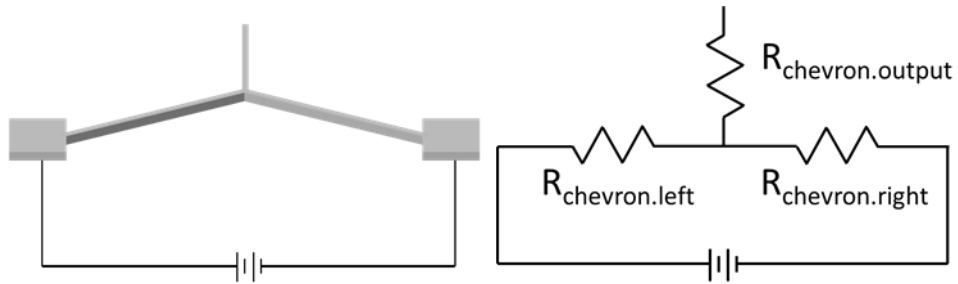


그림 4.3 Chevron beam과 그 등가저항

그림 4.3과 같이 chevron beam을 등가저항으로 표현하면, chevron output beam의 저항은 양단에 같은 전압이 인가되어, 전류가 흐르지 않는다. 따라서 가해진 전압은 모두 chevron beam을 가열하는데 쓰이게 된다. Chevron output beam에는 전도로 인한 열만이 전달되게 된다[23]. 그러므로 구조물을 팽창시키는데 쓰이는 전력은  $P=V^2/R$ 으로 표현 가능하고 chevron beam의 저항에만 영향을 받게 된다. 따라서 변위는 전압에 대해 이차함수 형태의 그래프를 보이게 된다.

픽셀 수로부터 변위를 구하는 방식으로 5개의 소자에서 셔터가 완전히 움직일 때까지의 변위를 정리한 그래프는 그림 4.4과 같다.

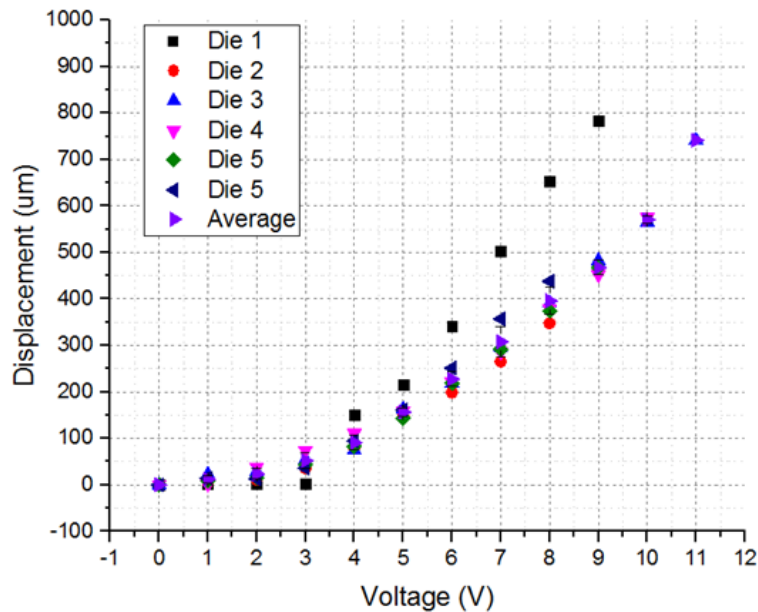


그림 4.4 5개 소자의 전압 상승 구간 전압-변위 그래프

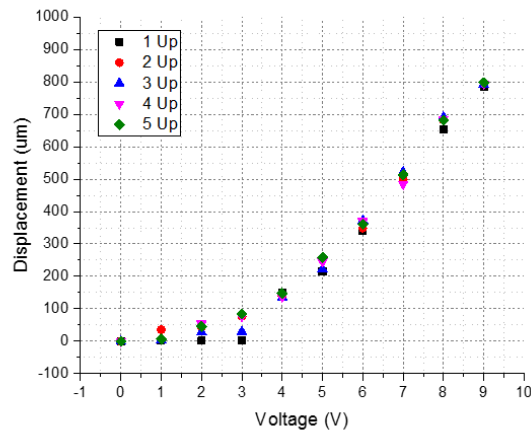
Die 1의 경우  $25\mu\text{m}$ 로 CMP한 웨이퍼에서 나온 소자이며 나머지 소자들은  $30\mu\text{m}$ 로 CMP한 웨이퍼에서 나온 소자이다.  $30\mu\text{m}$  웨이퍼에서 나온 소자에 대해서는 오차 막대와 함께 그래프를 표시하였다. 2장에서 시뮬레이션 한 결과에 비해 같은 전압에서 적은 변위가 생성되었는데 이는 DRIE 공정에서 output beam이 식각 될 것이라고 예상한 두께보다 덜 식각되어 beam의 두께가 증가하였고 또한 release 공정 후 완전히 감광막을 제거하지 못해 감광막으로 인한 저항 증가라 여겨진다. 실제 측정한 저항(시뮬레이션 input:  $300\Omega$ ) 및 chevron output beam(시뮬레이션 input:  $4\mu\text{m}$ ) 두께로 다시 시뮬레이션 한 결과는 표 4.1과 같다.

	Die 1	Die 2	Die 3	Die 4	Die 5
Displacement ( $\mu\text{m}$ ) @8V	653.57	347.31	390.75	379.93	374.65
Resistance (ohm)	840	1231	1128	1130	1100
Output beam width ( $\mu\text{m}$ )	3.9	3.8	3.8	3.9	3.8
Displacement ( $\mu\text{m}$ ) simulation	629	364	397	394	410

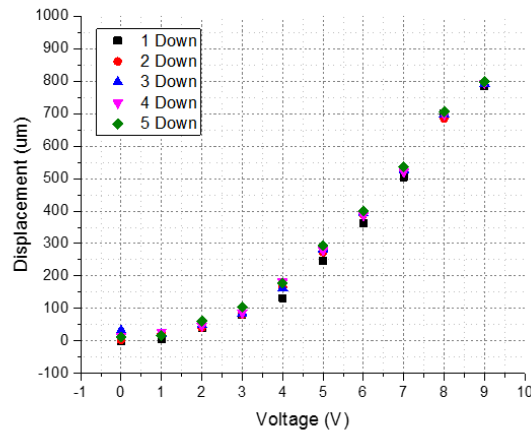
표 4.1 실제 측정한 수치와 그에 따른 재 시뮬레이션 결과

### 4.3 Hysteresis 측정

Chevron beam이 전압 상승에 따라 열을 받아 팽창한 후 전압을 낮춰 다시 수축하게 되면 상승할 때와 같은 전압을 가하더라도 잔류 열에 의해 변위가 다른 hysteresis 현상이 나타나게 된다[24]. 이를 확인하기 위해 한 개의 소자에 대해 5회에 걸쳐 전압의 상승과 하강을 반복하며 변위를 측정하였고 그 결과는 그림 4.5와 같다.



(a)



(b)

그림 4.5 전압 (a)상승 (b)하강 구간에서 1개 소자의 전압-변위 5회 측정 결과

5회의 상승, 하강 동안 측정된 변위의 평균 값을 오차 막대와 같이 나타내었으며 그 결과는 그림 4.6과 같이 같은 전압에서 잔류 열에 의해 하강시의 변위가 상승시의 변위보다 더 크게 나타남을 확인 할 수 있으며 상승과 하강시의 변위 평균의 차에 대해 표 4.2에 정리하였으며, 그 수준은 평균  $21.11\mu\text{m}$ 로 최대 변위 대비 2.66% 이다. 그리고 최대

동작 변위를 전압으로 나눈 값으로 표현하면  $88.1 \mu\text{m}/\text{V}$ 의 값을 보였다.

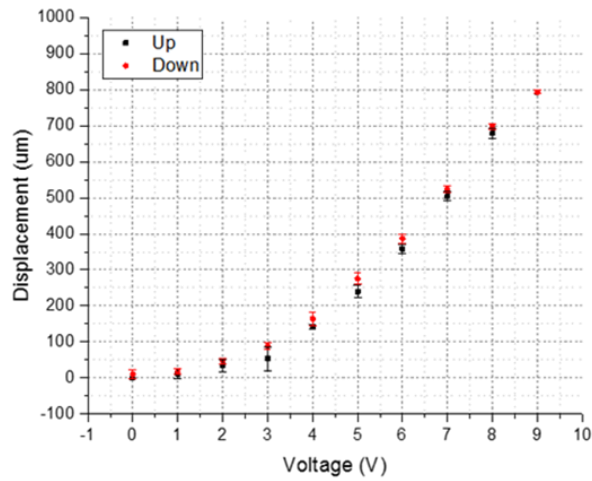


그림 4.6 전압 상승 및 하강시 평균 변위 그래프

전압 (V)	상승 변위 ( $\mu\text{m}$ )	하강 변위 ( $\mu\text{m}$ )	하강-상승 변위 차이 ( $\mu\text{m}$ )
0	0	10.87	10.87
1	11.79	18.79	6.99
2	34.18	47.85	13.67
3	53.75	88.18	34.43
4	141.80	164.28	22.47
5	239.63	275.50	35.87
6	358.57	386.85	28.28
7	504.13	523.26	19.13
8	678.88	697.21	18.32
9	793.32		평균: 21.11

표 4.2 전압 상승, 하강시 변위와 각 전압별 변위 차이

그리고 hysteresis 역시 달라진 측정 값을 넣어 재 시뮬레이션 한 결과를 그림 4.7에 나타내었으며, 1.2절에서 서술한 연구동향의 변위/전압 수치와 측정 결과의 변위/전압 수치를 비교한 그래프를 그림 4.8에 정리하였다.

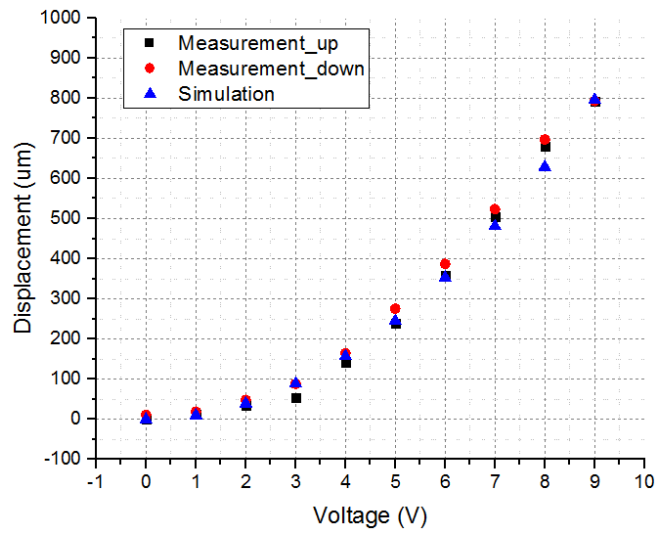


그림 4.7 측정 결과와 실제 측정 결과에 따른 재 시뮬레이션 결과

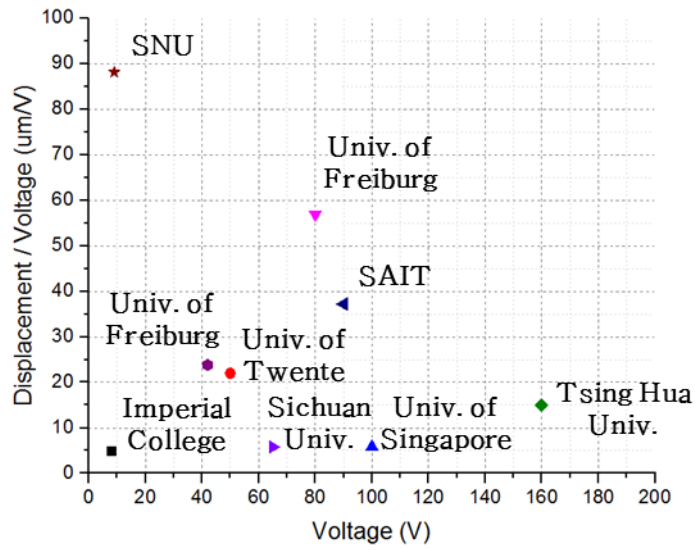


그림 4.8 측정 결과와 최근 연구 결과의 비교 그래프

## 제 5 장 결 론

본 논문에서는 거리센서에 이용 될 수 있으며 차량용 모듈에 들어갈 수 있는 chevron 구조를 사용한 electro thermal two phase aperture를 제안하였다. 이 소자의 주요 응용 분야 중 하나인 차량용 모듈이 가지는 설계 한계를 극복하기 위하여 상대적으로 낮은 전압에서 큰 변위를 얻을 수 있도록 chevron beam과 misaligned 구조를 사용한 aperture를 설계하였으며 시뮬레이션을 통하여 최대 변위를 가질 수 있는 각 변수들의 수치를 결정하였다.

시뮬레이션을 토대로 서울대학교 반도체공동연구소에서 구조물을 형성하기 위해 4인치 p-type (111) 실리콘 웨이퍼에  $30\mu\text{m}$  깊이의 단차를 형성하였다. 4인치 글래스 웨이퍼에는 빛을 가리고 aperture diameter를 형성하기 위한 패턴을 형성하기 위해 Cr 을 전면에 100nm 두께로 증착 후 사진 공정 및 식각 공정을 이용해 패턴을 형성하였다. 이후 KIST 나노팩센터에서 패터닝이 된 실리콘 웨이퍼와 글래스 웨이퍼를 양극 접합한 뒤, 실리콘의 두께가 각각  $54\mu\text{m}$ ,  $60\mu\text{m}$ ,  $66\mu\text{m}$ 가 되도록 CMP 공정을 진행해 실리콘을 얇게 연마하였다. 이후 전압을 인가해 줄 수 있는 Cr 전극 패드를 실리콘 backside에 100nm 두께로 형성하고 DRIE 장비를 사용해 release 공정을 거쳐 원하는 구조물을 형성했다.

DC 전압에 따른 변위와 전압의 상승과 하강에 따른 hysteresis 또한 확인하였다. 제작된 소자를 probe station을 이용해 DC 전압에 대한 변위의 특성을 확인하였다. 9V의 전압을 인가하였을 때,  $793.32\mu\text{m}$ 의 변위를 생성하였으며, 전압의 상승과 하강에 따른 hysteresis는 평균  $21.11\mu\text{m}$ 로 최대 변위 대비 2.66% 수준으로 실제 모듈에 사용할 수 있을 정도의 범위를 가짐을 볼 수 있었다. 기존의 연구 결과들과 비교하였을 때, 가장 우수한 전압 대비 변위를 보였다.



## 참고 문헌

- [1] National Highway Traffic Safety Administration. "Preliminary statement of policy concerning automated vehicles." *Washington, DC* (2013): 1–14.
- [2] Syms, R. R. A., et al. "Sliding-blade MEMS iris and variable optical attenuator." *Journal of micromechanics and microengineering* 14.12 (2004): 1700.
- [3] Schuhladen, Stefan, et al. "Iris-Like Tunable Aperture Employing Liquid-Crystal Elastomers." *Advanced Materials* 26.42 (2014): 7247–7251.
- [4] Zhou, Guangya, et al. "Microelectromechanical–systems–driven two–layer rotary–blade–based adjustable iris diaphragm." *Optics letters* 37.10 (2012): 1745–1747.
- [5] Draheim, Jan, et al. "Variable aperture stop based on the design of a single chamber silicone membrane lens with integrated actuation." *Optics letters* 36.11 (2011): 2032–2034.
- [6] Tsai, C. Gary, and J. Andrew Yeh. "Circular dielectric liquid iris." *Optics letters* 35.14 (2010): 2484–2486.
- [7] Chang, Jong–hyeon, et al. "Variable aperture controlled by microelectrofluidic iris." *Optics letters* 38.15 (2013): 2919–2922.
- [8] Li, Lei, et al. "Adaptive liquid iris based on electrowetting." *Optics letters* 38.13 (2013): 2336–2338.
- [9] Murade, C. U., et al. "Electrowetting driven optical switch and tunable aperture." *Optics express* 19.16 (2011): 15525–15531.
- [10] Yang, Yu–Sheng, et al. "A large–displacement thermal actuator designed for MEMS pitch–tunable grating." *Journal of*

*Micromechanics and Microengineering* 19.1 (2008): 015001.

[11] Khazaai, Jay J., et al. "Displacement amplification and latching mechanism using V-shape actuators in design of electro-thermal MEMS switches." *Sensors, 2010 IEEE*. IEEE, 2010.

[12] Sinclair, Michael J. "A high force low area MEMS thermal actuator." *Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems, 2000. ITherm 2000. The Seventh Intersociety Conference on*. Vol. 1. IEEE, 2000.

[13] Roberts, R. B. "Thermal expansion reference data: silicon 300–850 K." *Journal of Physics D: Applied Physics* 14.10 (1981): L163.

[14] Toulminet, Gwenaëlle, et al. "Vehicle detection by means of stereo vision-based obstacles features extraction and monocular pattern analysis." *IEEE transactions on Image Processing* 15.8 (2006): 2364–2375.

[15] Subbarao, Murali, and Gopal Surya. "Depth from defocus: A spatial domain approach." *International Journal of Computer Vision* 13.3 (1994): 271–294.

[16] Whitehouse, J. C. "Range information using blurred images." *Journal of Physics D: Applied Physics* 23.11 (1990): 1342.

[17] Levin, Anat, et al. "Image and depth from a conventional camera with a coded aperture." *ACM transactions on graphics (TOG)* 26.3 (2007): 70.

[18] Wajs, Andrew Augustine. "Processing multi-aperture image data." U.S. Patent Application No. 13/579,569.

[19] Norton, P., and J. Brandt. "Temperature coefficient of resistance for p- and n-type silicon." *Solid-State Electronics* 21.7 (1978): 969–974.

[20] Bullis, W. M., et al. "Temperature coefficient of resistivity of

silicon and germanium near room temperature." *Solid-State Electronics* 11.7 (1968): 639–646.

[21] Karttunen, Jani, Jyrki Kiihamaki, and Sami Franssila. "Loading effects in deep silicon etching." *Micromachining and Microfabrication*. International Society for Optics and Photonics, 2000.

[22] Williams, Kirt R., Kishan Gupta, and Matthew Wasilik. "Etch rates for micromachining processing—Part II." *Journal of microelectromechanical systems* 12.6 (2003): 761–778.

[23] Allen, Philip B. "Conduction of heat." *The Physics Teacher* 21.9 (1983): 582–587.

[24] Rubel, Paul J. "Hysteretic MEMS thermal device and method of manufacture." U.S. Patent No. 7,548,145. 16 Jun. 2009.

## Abstract

# Electro Thermal Two Phase Aperture for Distance Sensor Module

WooJin Yang

Department of Electrical  
And Computer Engineering  
The Graduate School  
Seoul National University

Recently, research about the autonomous vehicles is widely performed. As autonomous vehicles became one of the trend research topic, assisting autonomous driving system is under the research in the area of software, algorithms, and hardware.

In terms of hardware research, it is important to preempt the sensor and module market for autonomous driving system. Especially, numerous aperture research has been ongoing in many types such as electrostatic, electro thermal, piezoelectric and so on.

In this paper, electro thermal two phase aperture is proposed which can be used for various application on the distance sensor. Specifically, the aperture for automobile have to operate with low voltage and large displacements. To satisfy those conditions, electro

thermal two phase aperture with misaligned chevron beams is suggested.

Chevron beam consists two beams with pre-bent angle which gives the direction towards to the bent direction. As temperature of chevron beam increases, beam length increases proportional to two main factors which is thermal expansion coefficient of the material and the length of the beam.

To maximize the displacement of the device, two chevron output beams are misaligned by  $30\text{ }\mu\text{m}$  each. This misalignment amplifies the output displacement of chevron beams by principle of the lever.

The dimension of misaligned beams is designed by ANSYS 16.0 simulator with various inputs.

First, beam width and displacement are inversely proportional. As beam width gets wider, flexibility of beams and the resistance of the device decreases. This decrease of flexibility limits the displacement of the device. Also, as decrease of resistance, device cannot achieve enough heat for same induced power.

Second, pre-bent angle has a maximum displacement peak point around 2 to 2.5 degree. After the peak point, displacement of the device decreases.

Also, length between two misaligned chevron output beams has peak point around  $25\text{ }\mu\text{m}$  to  $35\text{ }\mu\text{m}$  which creates the largest displacement of the device. After passing the peak point, the displacement decreases steadily due to the limitation of single beam output for same induced power.

With these simulation results, width of chevron beams and chevron output beams set to  $10\text{ }\mu\text{m}$  and  $3.2\text{ }\mu\text{m}$  respectively. The pre-bent angle is set to 2 degrees which can creates maximum

displacement. For misalignment, it is set to  $30\text{ }\mu\text{m}$ . This setup can create maximum displacement with this dimension value.

The device is fabricated at the Inter-university Semiconductor Research Center (ISRC), in Seoul National University. 4 inch p-type (111) silicon wafer and borosilicate glass wafer was used, and chromium layer was deposited to fabricate metal pattern.

For silicon wafer process, photo lithography process and DRIE (Deep Reactive Ion Etch) process was performed. First DRIE was used to fabricate cavity which is essential to make released structure. The target of the depth of DRIE was  $30\text{ }\mu\text{m}$  which actually came out as  $30.83\text{ }\mu\text{m}$ ,  $32.22\text{ }\mu\text{m}$ ,  $31.80\text{ }\mu\text{m}$  on three wafers each.

To create metal pattern which will be functioned as blocking the light, 100nm of chromium layer was deposited with SRN sputter. After deposition, photo-lithography process was performed. In RIE (Reactive Ion Etching), chromium layer was etched with photo resist pattern behave as the etching mask.

The patterned silicon and glass wafer was anodically bonded in Micro-Nano fab center, KIST. The cavity between wafers was in vacuum. Followed process was CMP (Chemical Mechanical Polishing) process that will create the thickness of silicon layer to  $25\text{ }\mu\text{m}$ ,  $30\text{ }\mu\text{m}$ ,  $35\text{ }\mu\text{m}$  each.

To fabricate chromium electrode pad, chromium was deposited 100nm once more and metal etching process was performed with RIE device. To release the structure, silicon layer was fully etched by DRIE. To prevent any damage to the beam and narrow pattern, the DRIE process was divided into several operations step and wafers were frequently checked.

To measure the displacement of the device with the voltage

applied, the measurement was performed in probe station. The power was induced through the gold probe tips which is connected to chromium electrode pad. The voltage was increased 1V at a time until the shutter was fully opened. The measurement also was performed with dropping the voltage 1V at a time until the shutter closed itself.

As a result,  $793.32\ \mu\text{m}$  of displacement can be achieved at 9V of DC voltage. The average hysteresis is  $21.11\ \mu\text{m}$  which is 2.66% of maximum displacement.

**Keywords:** chevron thermal actuator, thermal aperture, hysteresis

**Student Number:** 2014–22566